

625.173  
№ 88

НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ КОМИТЕТ  
НАРОДНОГО КОМИССАРИАТА ПУТЕЙ СООБЩЕНИЯ

---

X  
2

Выпуск № 85

M 3800

# ИССЛЕДОВАНИЕ РАБОТЫ РЕЛЬСА И РЕЛЬСОВОЙ НАКЛАДКИ

ДЕВЯТНАДЦАТЫЙ СБОРНИК  
ОТДЕЛА ИНЖЕНЕРНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

---

СССР—ТРАНСПЕЧАТЬ—НКПС  
МОСКВА—1928

623.  
488.

НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ КОМИТЕТ  
НАРОДНОГО КОМИССАРИАТА ПУТЕЙ СООБЩЕНИЯ

920, TIM

1972

Выпуск № 85

025.43 (47)

# ИССЛЕДОВАНИЕ РАБОТЫ РЕЛЬСА И РЕЛЬСОВОЙ НАКЛАДКИ

41378  
НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКАЯ  
БИБЛИОТЕКА СССР

Др. 89, 96, 08

РЕСПУБЛИКАНСКИЙ  
НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ  
БИБЛИОТЕКА СССР

Дер.

ДЕВЯТНАДЦАТЫЙ СБОРНИК  
ОТДЕЛА ИНЖЕНЕРНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

СССР — „ТРАНСПЕЧАТЬ“ — НКПС  
МОСКВА—1928

ÉTUDE DU TRAVAIL DU RAIL ET DE  
L'ECLISSE DES RAILS

RECUEIL XIX  
de la Division pour Recherches Scientifiques des  
Ouvrages d'Art

---

URSS — «Transpétchate» — Com. du P. des Voies de Communic.  
Moscou—1928

## О Г Л А В Л Е Н И Е.

	Стр.
1. От Научно-Технического Комитета. ....	4
2. Инж. <b>П. С. Рубан.</b> Предисловие. ....	5
3. Инж. <b>П. С. Рубан.</b> Исследование стыковой рельсовой накладки нормального типа. ....	7
4. Инж. <b>П. С. Дьяков.</b> О работе рельсов под действием статической нагрузки. ....	52
5. Инж. <b>В. В. Григорьев.</b> Влияние колебаний температуры на рельсовый путь. ....	76
6. Инж. <b>В. В. Григорьев.</b> Статический расчет рельсов. ....	128

## TABLE DES MATIERES.

	Page.
1. Préface. ....	4
2. Ing. <b>P. S. Rouban.</b> Questions générales. ....	5
3. Ing. <b>P. S. Rouban.</b> Étude de l'éclisse des rails du type normal. ....	7
4. Ing. <b>P. S. Diakov.</b> Travail des rails sous l'action de la charge statique. ....	52
5. Ing. <b>V. V. Grigoriev.</b> Action des variations de la température sur la file de rails. ....	76
6. Ing. <b>V. V. Grigoriev.</b> Calcul statique des rails. ....	128

## ОТ НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКОГО КОМИТЕТА.

В 1925 году при Отделе инженерных исследований Научно-Технического Комитета для производства экспериментальных и теоретических исследований верхнего и нижнего строения рельсового пути было организовано Путьевое Бюро.

По окончании оборудования Бюро приборами в 1926 и 1927 году явилась возможность произвести ряд исследований работы рельсового пути на М.-Киево-Воронежской, Южных и М.-Курской ж. д.

Описание некоторых наиболее важных исследований рельсового пути, из которых возможно сделать предварительные выводы, помещены в настоящем выпуске. Все статьи составлены инженерами, работающими в Бюро.

Статья инж. П. С. Рубана содержит в себе описание произведенных исследований работы стыковой рельсовой накладки нормального типа.

В статье инж. В. В. Григорьева помещены описания опытов и наблюдений над влиянием наружной температуры воздуха на температуру рельсов, лежащих в пути, на их удлинение и на внутренние напряжения, вызываемые сопротивлением рельсов этим удлинениям.

В статье инж. С. П. Дьякова описывается производство опытов по статическому определению внутренних напряжений в рельсах типа III-а под нагрузкой паровоза серии СУ в различных положениях.

Кроме того, в выпуске помещена статья инж. В. В. Григорьева о статическом расчете рельсов на упругих опорах с построением инфлюэнтных линий момента и опорного давления с использованием автором принципа Маквелля о взаимности перемещений.

В выпуске № 54 1927 года Научно-Технического Комитета был помещен метод построения инфлюэнтных линий, предложенный инж. В. П. Крачковским, которым для упрощения задачи построения инфлюэнтных линий был использован принцип симметрии.

Применение этого принципа дало возможность свести эту задачу к разрешению системы пяти уравнений с пятью неизвестными. Метод, примененный инж. В. В. Григорьевым, позволяет сделать дальнейшие шаги по значительному упрощению расчета. Решения задачи построения инфлюэнтных линий для рельса, как для неразрезной балки на упругих опорах, сводят эту задачу в любом случае расчета к решению только двух уравнений с двумя неизвестными.

Выводы, сделанные в первых трех статьях, являются предварительными, и для всестороннего освещения вопроса об устойчивости пути и действующих в нем напряжений потребуются производить дальнейшие экспериментальные и теоретические исследования.

Настоящий выпуск редактировал член Совета Научно-Технического Комитета И. Я. Манос.

Научно-Технический Комитет.

## ПРЕДИСЛОВИЕ.

Настоящий сборник Трудов Научно-Технического Комитета является первым выпуском статей по экспериментальным работам Путевого Испытательного Бюро, и является своевременным дать хотя-бы самый краткий очерк организации работ по исследованию пути Научно-Техническим Комитетом, а также сказать несколько слов о постановке первых опытов и наблюдений.

В середине 1925 года Научно-Техническому Комитету, по его представлению, Коллегией НКПС было разрешено организовать Путевую Испытательную станцию, впоследствии переименованную в Путевое Испытательное Бюро для постановки на железных дорогах работ по научному исследованию и для изучения взаимодействия между подвижным составом и путем, а также по определению деформаций и напряжений, возникающих как в отдельных элементах верхнего строения пути и земляного полотна, так и, в совокупности, в системе этих элементов, в целях нахождения правильных методов оценки работы и теоретического расчета железнодорожного пути.

Разрешение вопроса о наиболее целесообразной постановке исследования и изучения верхнего строения пути и земляного полотна приводит к построению исследовательской организации таким образом, чтобы, с одной стороны, иметь возможность производить исследования лабораторного характера, а с другой—исследования полевого характера.

К работам первой категории следует отнести все те исследования, при которых возможно обойтись без поездной нагрузки, заменяя ее силовой лабораторной установкой, когда по условиям исследуемого явления необходимо выделить влияние некоторых факторов из общей совокупности комплекса одновременно действующих факторов с тем, чтобы либо достигнуть большей ясности и точности в протекании исследуемых процессов, либо раскрыть таким путем внутреннюю зависимость явлений и сделать их доступными исследованию. В некоторых случаях такой способ будет носить характер лишь предварительного способа, подготовительного для перехода к исследованиям тех же явлений, но уже в условиях действующего пути и под подвижной поездной нагрузкой.

Конечно, в зависимости от того, как широко может быть организована такая лаборатория, будет зависеть и выбор тем, подлежащих исследованию. При известных условиях Путевая Лаборатория может быть использована для постановки наблюдений, требующих длительного воздействия на путь, а также для получения некоторых статистических данных. Понятно, что изучение некоторых явлений, требующих длительного наблюдения, успешно может проводиться на дорогах, но в условиях согласованного и организованного проведения наблюдений над ними.

Основными же работами, конечно, должны быть работы по изучению и исследованию пути в условиях эксплуатации его. Для исследований такого рода служит Путевое Испытательное Бюро, выезжающее на тот участок пути, который оказывается наиболее подходящим для разработки поставленной темы.

Для изучения путевого балласта и земляного полотна, являющихся важными составными элементами пути и требующих при их исследовании специальных и отличных от применяемых при исследовании пути методов для определения качеств, рода и состава балласта и грунтов, служащих для образования земляного полотна, необходимо иметь специальную лабораторию. Такая лаборатория должна быть органически связана с путевой исследовательской организацией. В настоящее время временно эти исследования производятся Грунтовой Лабораторией НТК.

Правильность намеченной организационной схемы подтверждается почти трехлетним опытом Путевого Испытательного Бюро.

Дело исследования пути совершенно новое, требует большой осмотрительности и серьезной продуманности, как в отношении выбора методов, так и в отношении выбора приборов. Поэтому совершенно правильно начинать работу при всякой возможности использовать приборы. Всякая работа не только вырабатывает необходимую подготовку и способствует усвоению точных исследовательских приемов, но и развивает навык в обращении с приборами и, наконец, при недостатке оборудования хотя и заставляет упрощать некоторые задачи, но в то же время вынуждает выбирать наиболее простые темы, т. е. заставляет постепенно переходить от более простых к более сложным темам.

В настоящем сборнике помещены некоторые из первых работ Путьевого Испытательного Бюро. Не вошли в сборник те работы, при производстве которых обнаружилась необходимость внести некоторое изменение в методы исследования, а также те, по которым не была закончена обработка (исследование динамических напряжений в рельсах).

Выбор исследовательских работ не имеет случайного характера и отвечает составленной программе, по которой все работы распадаются на два основных отдела.

К первому отделу относится исследование пути, не нагруженного поездом, а ко второму отделу—исследование пути, нагруженного поездом.

Путьевое Бюро имеет возможность и ведет исследование по обоим отделам программы.

Стыковая проблема, являясь наиболее загадочной и менее всего разработанной, издавна приковывает к себе общее внимание. Правильное разрешение стыковой проблемы само по себе приведет к значительному усилению пути. А потому исследование работы и службы стыковой рельсовой накладки явилось одной из первых работ, проведенных Путьевым Испытательным Бюро.

Органически связанной со стыком является укладка рельсового пути из сваренных рельсов.

Если такой способ укладки пути и не приведет к полному уничтожению стыковых накладок, то, во всяком случае, он ведет к уменьшению числа стыков и ставит вопрос об укладке в путь наиболее длинных рельсов. Эта проблема в настоящее время стала вопросом дня и для исследования ее выдвигается целый ряд тем, именно: по продольной и поперечной устойчивости пути, о колебании температуры в рельсах, о температурных удлинениях и напряжениях и пр. Инженер В. В. Григорьев в статье: «Влияние колебаний температуры на рельсовый путь» разработал материалы, полученные наблюдениями Путьевого Испытательного Бюро.

Исследование статических и параллельно с ними динамических напряжений в рельсах т. III-а под наиболее мощными паровозами серии С<sup>У</sup>, является наиболее подходящим сочетанием, чтобы сделать сопоставление, для наиболее распространенного типа рельсов и наиболее мощных пассажирских паровозов, величин теоретических и экспериментальных напряжений. Для полных заключений эта работа потребует значительного материала, но уже на основании предварительных исследований по статике получаются интересные сопоставления, выдвигающие совершенно очевидную необходимость произвести работы по одновременному исследованию напряжений в рельсах, упругих свойств балласта, шпал и земляного полотна, каковая работа и организуется. Только путем исследования работы каждого из элементов пути возможно будет уяснить причину значительной расхожимости между теоретическими и экспериментальными величинами, выявленной опытным исследованием.

Вопросам статике отведены две статьи: самостоятельно разработанная статья В. В. Григорьева «Статические расчеты рельсов» и статья П. С. Дьякова «О работе рельсов под действием статической нагрузки», дающие сводку материалов, полученных и обработанных Пут. Испытательным Бюро. Организация Путьевого Испытательного Бюро и проведение работ по исследованию пути поручены мне. Работы проведены при участии инженеров Бюро: П. С. Рубан, П. С. Дьякова, В. В. Григорьева, С. С. Шустрова и С. Я. Терехина.

## Исследование стыковой рельсовой накладки нормального типа.

### Введение.

Самым слабым местом в современном рельсовом пути является стык. Происходящая вследствие этого неравномерная прочность пути технически недопустима и экономически не целесообразна, ибо на таком пути могут возникать преждевременные местные ослабления и расстройства, смятие рельсов, порча и поломки подвижного состава.

Теоретически, стыковое соединение рельсовых концов должно иметь такую конструкцию, чтобы рельсовый путь на всем своем протяжении был одинаково прочен и устойчив и чтобы по разомкнутой стыковым зазором рельсовой колее движение колес подвижного состава совершалось совершенно плавно и без удара при переходе колеса с одного, попутного, на другой, встречный рельс.

В этом случае речь идет о встрече колеса с верхней поверхностью головки встречного рельса в расстоянии от 50 до 75 см от стыкового конца его, происходящей вследствие изгиба рельсовых концов в стыке при перекатывании колеса через стык. Соприкосновение же колеса с торцовым концом встречного рельса обычно не может происходить, так как при перекатывании колеса через стык в момент перехода его с попутного на встречный рельс, этот последний, изгибаясь, принимает такую форму, что торцовый конец его располагается ниже вершины выпуклой, обращенной к колесу, поверхности катания его (рельса) головки. В этот момент происходит одновременное соприкосновение поверхности катания колеса с двумя изогнутыми, выпуклостью вверх, поверхностями катания головок обоих стыковых рельсов, а потому торцовый удар в конце встречного рельса оказывается явлением совершенно исключительным и говорить о нем, исследуя стык, не приходится.

Непрерывность рельсовой колеи находится в противоречии с существованием стыкового зазора, наличие которого, при современной укладке и конструкции пути, необходимо для свободных продольных перемещений рельсов, вызываемых температурными растяжением и сжатием. И даже более того, для возможности такого перемещения концы рельсов не должны иметь глухого закрепления в стыковом соединении, а кроме того, для уменьшения трения по прилегающим поверхностям к накладкам головки и подошвы рельса, делались предложения смазывать эти поверхности графитом или другими веществами, увеличивающими продольное скольжение рельса в закатом стыке, что требует свободного стыкового зазора.

Для смягчения же вертикального удара необходимо, чтобы стык имел такую конструкцию, при которой расстояние между точками одновременного соприкосновения колеса с соседними рельсами, при переходе его через стык, было бы возможно наименьшим, стремящимся к нулю. Удар будет отсутствовать тогда, когда обе точки соприкоснутся в одну, что было бы возможно, во первых, при у н и ч т о ж е н и и з а з о р а, а во вторых, либо при полном отсутствии прогиба рельсов, либо при таком упругом прогибе обоих концов, при котором обе ветви кривых изгиба рельсов образовывали бы одну плавную непрерывную кривую.

Таким образом, стыковые концы рельсов должны быть так закреплены, чтобы не иметь вертикальных перемещений и в то же время иметь свободное продольное перемещение.

Но так как, с другой стороны, противодействие перемещению рельсов и стыковых шпал вследствие угона пути нередко передается также на стыковое скрепление и так как при этом требуется, чтобы стыковой зазор не закрывался и чтобы расстояние между осями стыковых шпал и их положение в пути оставалось неизменным, что требует



неподвижного закрепления рельсов и шпал, то, естественно, что ради этого стыку должна быть придана такая конструкция, которая могла бы обеспечить требуемую неподвижность рельсов и шпал. Для этого угол наклона нижней поверхности головок и верхней поверхности подбив рельсов выбирают такой величины, чтобы заклиненная накладка получала наибольшую силу трения по поверхности касаний.

Итак, стыковое соединение одновременно должно удовлетворять ряду взаимно исключающих друг друга требований: оно должно обеспечивать непрерывность колеи при существовании зазора в стыке, должно допускать подвижность рельсовых концов для температурных продольных перемещений, оказывать противодействие угону рельсов и задерживать перемещение стыковых шпал, должно быть достаточно жестким, прочным, легким, простым и дешевым.

Предполагается, что такое универсальное стыковое соединение, обслуживающее все эти требования, сконструировано на нашей сети железных дорог. Приходится так условно говорить о стыковом соединении на наших железных дорогах, так как работа стыка и стыковой накладки не исследованы, величины и распределение напряжений по накладке не изучены, причины и сила угона пути не уяснены и экспериментально не определены. Поэтому задача конструирования стыковой накладки, над разрешением которой с неослабевающим интересом неутомимо работало в течении долгого времени существования железных дорог много конструкторов и теоретиков специалистов, еще и до сих пор остается технически неопределенной и не получившей удовлетворительного разрешения не смотря на то, что за это время была проявлена богатая находчивость и широкая творческая конструктивная изобретательность.

Такое положение дела ведет к тому, что в настоящее время иногда раздаются голоса о безнадежности дальнейших попыток к построению рационального накладочного стыка. Существует даже круг железнодорожных инженеров, специалистов по путевой службе, считающих, что единственно целесообразным и правильным разрешением вопроса будет полный отказ от стыкового, посредством путевых накладок, соединения рельсовых звеньев и переход к укладке в путь сваренных рельсов.

Совершенно кратко, в нескольких словах, по сварке рельсов можно отметить следующее.

В 1903 году, т.-е. примерно 25 лет тому назад, К. Гольдшмидт поставил вопрос о термитной сварке рельсов на трамвайных путях и занялся постепенным развитием и усовершенствованием ее, благодаря чему техника сварки была доведена до такого состояния, что укладка сваренных рельсов на трамвайных путях получила повсеместное и широкое применение. На железнодорожных же путях, где соблюдению условий безопасности движения приходится предъявлять более строгие требования, в последнее время, главным образом в Германии, было сделано несколько попыток испытать сварку рельсов и произвести опытную укладку этих рельсов на станционных путях, в единичных случаях, на мостах и в туннеле. В недавнее время и у нас Южные, М.-Киево-Воронежская и М.-Курская железные дороги произвели опытную укладку сваренных рельсов на небольших участках путей, удобных для специального наблюдения. Произведена укладка сваренных рельсов также на двух или трех мостах, при чем на одном из них на места сварки поставлены дополнительно стыковые накладки, что подрывает доверие к сварке. Результаты опытных испытаний впереди.

С целью возможного устранения чрезмерно оптимистических надежд на сварку необходимо указать на следующие существенные недостатки термитной сварки: неоднородность металла в месте сварки, в некоторых случаях происходит не достаточно полное и сплошное приваривание термитного сплава к боковой поверхности шейки рельса, бурная плавка (реакция) и образование сильного выделения при этом газов, в результате чего получаются сильно пористый или поздравный металлы, образование раковин под закладной железной пластинкой между головками свариваемых рельсов и по всему шву ниже этой пластинки. Приводимые фотографии дают ясное представление о возможных недостатках, обнаруженных при продольном и поперечном разрезе нескольких образцов по месту сварки. (Рис. 1.).

Обе части одного и того же разреза уложены рядом так, что с одной стороны лежит часть рельса с отпиленными по линии шейки головкой и подошвой, а с другой стороны лежит вторая половина разреза, состоящая из части головки, термитного сплава, отпиленного от шейки, и части подошвы с ниже лежащим утолщением из

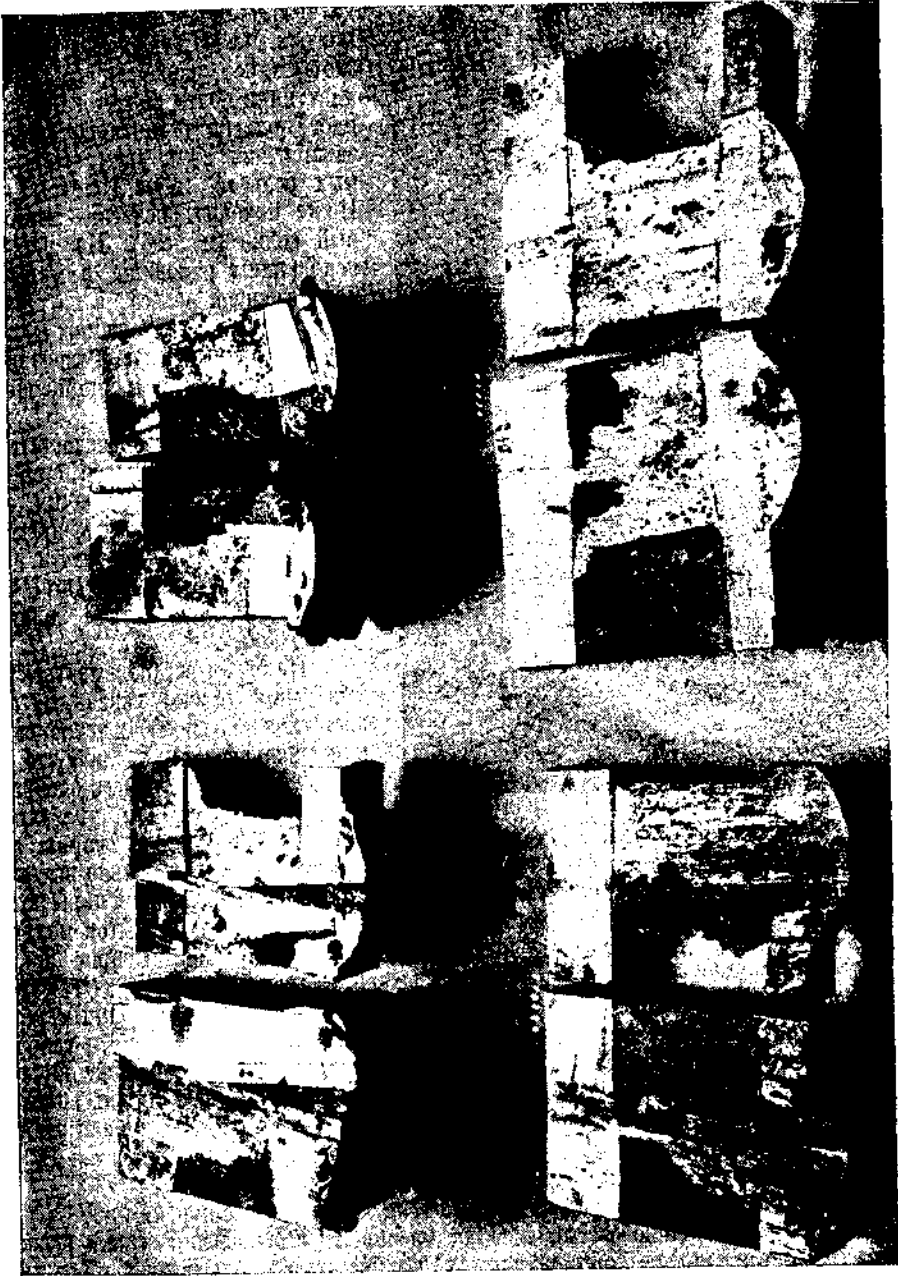


Рис. 1. Продольный вдоль шейки разрез сваренных рельсов.

термитного сплава. На снимке видны глубокие раковины в сплаве, а на шейках — белые, перемычки отходящие от головок. Приварка термитного металла к шейке произошла только в тех местах, которые на фотографии получились светлыми. Сварка была произведена с пластинкой в притык, комбинированным способом.

На рисунках 2 и 3 даны снимки с продольного разреза вдоль по оси сваренных рельсов. На рис. 2 общий вид в несколько уменьшенном размере, а на рис. 3 изображена средняя часть того же разреза, но в  $1\frac{3}{4}$  раза увеличена. Гладкие части—тело рельса, белая полоска, идущая по середине снимка,—железная пластинка, закладываемая при сварке в притык между головками рельсов (комбинированная сварка). Ниже пластинки почти до самого низа—идет полоска термитного сплава, заварившая стык двух свариваемых рельсов ниже головок их. Ниже подошвы рельса — термитный сплав (железо). На рис. 2 ясно видны раковины в металле под подошвой рельса, а на рис. 3 видны раковины и трещины в стыке сваренных рельсов. Разрез сделан по отрезку сваренной части двух рельсов.

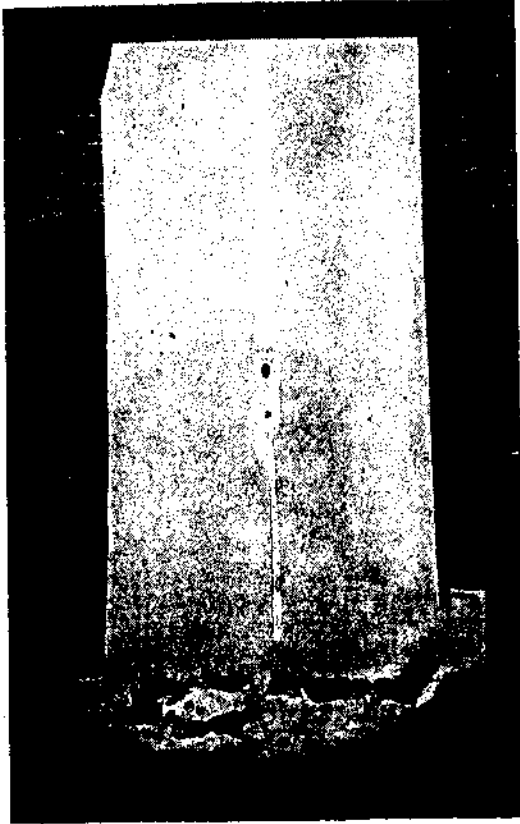


Рис. 2. Общий вид разреза по сварке вдоль продольной оси сваренных рельсов.

Появление таких недостатков в большей или меньшей степени зависит от случайных причин, которые, если и могут быть предотвращены, то только отчасти. Существование же этих трудно обнаруживаемых недостатков влияет на прочность.

Не будем останавливаться на выяснении причин указанных недостатков и на способах устранения или уменьшения их, ибо это не входит в тему настоящего очерка.

С одной стороны, указанные недостатки термитной сварки, а с другой стороны, довольно высокая стоимость сварки одной пары рельсов

привели к испытанию электроприварки накладок. Результаты этих опытов получились не удовлетворительные. Такая приварка оказалась непрочной. Вопрос же по электросварке рельсов в притык еще мало известен.

Служба, устойчивость и прочность железнодорожного пути из сваренных рельсов еще недостаточно широко и полно исследованы. Особенности содержания и условия или способ ремонта такого пути не установлены. Простого способа обнаружения особенно легко появляющихся зимою в местах сварки волосных трещин, ведущих впоследствии к излому рельсов, до сих пор не имеется. \*) Это тем более важно, что такие трещины появляются при сильных морозах, а затем плотно закрываются и становятся совершенно незаметными при незначительном уменьшении холода.

Справедливость заставляет признать, что если еще и до сих пор не имеется удовлетворительно разработанного стыкового соединения, то в отношении сварки рельсов также не все обстоит вполне благополучно и не все достаточно полно разработано и исследовано. Словом, еще нет твердых оснований видеть в укладке в путь сваренных

\*) В „Engineering News—Record April 19, 1928 г. стр. 622—623 имеется описание аппарата E. A. Sperry для определения мелких дефектов в рельсах. Но для данной цели, для повседневного обхода требуются более простые и более примитивные способы, годные для использования их при ежедневных обходах пути.

рельсов больше, чем опыт, а потому в настоящее время невозможно отказываться от стыкового накладочного соединения рельсовых звеньев и нет оснований рассчитывать на полное его отмирание. Даже если бы и явилась техническая возможность теперь же перейти на сварку рельсов, то и в таком случае потребовалось бы значительное время на проведение сварки на протяжении всей сети железных дорог. В течение этого времени накладочный стык *volens poleps* должен будет существовать. Следовательно, укладка главного пути из сваренных рельсов в настоящее время все же дело лишь возможного будущего, а накладочный стык — дело настоящего. Это — реальная действительность. Поэтому нет никаких оснований отказываться от исследования стыка и не следует оставлять конструктивной разработки стыкового соединения. Это положение может служить объяснением, почему на требование повышенной прочности пути техники неотступно отвечают усиленной разработкой новых типов и систем стыковых накладок, а не каких либо иных соединений рельсов.

Не ошибаясь, можно быть вполне уверенным в том, что рельсовый накладочный стык просуществует еще во всяком случае такое количество времени, которое вполне оправдывает затрату человеческого труда, положенного на изыскание основ для расчета и выработку рациональной накладки и стыкового закрепления рельсов.

Но при этом вполне очевидно, что в вопросе разработки и проектирования стыкового посредством накладок соединения рельсов необходимо стать на путь возможно точного, теоретически обоснованного расчета и сойти с практиковавшегося до сих пор чисто интуитивного, по чутью, построения накладки и стыкового закрепления.

Совершенно недостаточно довольствоваться лишь непосредственными, наглядного характера, общими наблюдениями износа рельсовых стыковых концов и службы рельсового стыка с тем, чтобы таким путем установить только, насколько уложенная в путь накладка нового типа, по сравнению с существовавшей ранее накладкой, оказала влияние на уменьшение смятия рельсовых концов и в какой мере при этом оказывается более или менее покойным проход поезда по стыкам.

Следует ясно и определенно установить те требования, которым должен удовлетворять стык и отделить от стыкового скрепления все то, что вызывает излишнее расстройство стыка, нарушает его прочность и конструктивно не только не может, но и не должно быть с ним связано, чтобы иметь возможность технически правильно построить стыковую накладку. Хорошая стыковая накладка, во всяком случае, будет стоить дешевле, нежели снятый с пути с разбитым концом рельс.

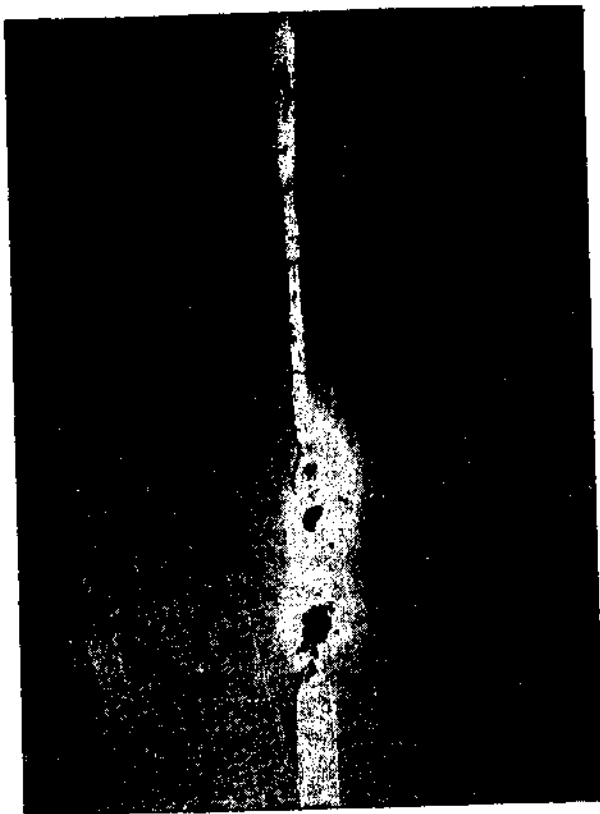


Рис. 3. Вид части того же разреза. Увеличено в  $1\frac{3}{4}$  раза против н. в.

Для того же, чтобы иметь возможность и основание выработать правильные условия и требования для построения рациональной стыковой накладки, необходимо предварительно провести ряд систематических экспериментальных исследований с целью изучения величин и распределения внутренних напряжений, возникающих в накладке и в стыковых концах рельсов при действии на путь внешних сил. Необходимость таких исследований давно назрела и вполне очевидна.

В последующем излагается постановка и результаты первых предварительных опытов по определению величин напряжений в различных местах путевой накладки под действием последовательно перемещаемой статической нагрузки от паровоза.

Опыты были поставлены Путевым Испытательным Бюро Научно-Технического Комитета.

До сих пор не приходилось встречать в литературе указаний не только на постановку аналогичных опытов, но вообще знакомиться с описанием каких-либо опытов, поставленных с этой целью.

Для первоначальной постановки опытов были использованы полученные Московским Мостовым Бюро тензометры Хуттенбергера. Применение их для путевых опытов оказалось возможным и подходящим вследствие их портативности. Необходимо было для возможности использования их Путевым Бюро найти способ установки их на накладке, пользуясь для того на первое время арматурой, приспособленной для установки их на элементах мостовых ферм.

Первый опыт был поставлен 26 октября 1926 года на соединительной с Октябрьской дорогой ветке М.-Курской железной дороги под паровозом серии Э, а последующие наблюдения были произведены в первых числах ноября того же года на сквозном станционном пассажирском пути главной линии М.-Киево-Воронежской железной дороги под пассажирским паровозом серии С<sup>у</sup>.

Здесь же должно с особым удовлетворением отметить полное, в значительной мере способствующее постановке этих опытов, содействие, оказанное Правлениями обоих выше упомянутых и Южных железных дорог.

Статья будет посвящена описанию по преимуществу опытов на М.-Киево-Воронежской железной дороге и результатов, полученных из них. На М.-Курской железной дороге, в общем, результаты опыта с накладкой типа П-а получились довольно сходные с результатами опытов на М.-Киево-Воронежской жел. дороге.

### 1. Подготовка опыта.

Путевым испытательным Бюро Научно-Технического Комитета была разработана следующая серия предварительных опытов по определению напряжений в шестидырной накладке нормального типа III-а:

- 1.—при полном числе всех шести болтов,
- 2.—при наличии только 4-х болтов,
  - а) при отсутствии 1-го и 6-го болтов,—двух крайних,
  - б) при отсутствии 2-го и 5-го болтов, как то видно на фотографии 5,
  - в) при отсутствии следующих 2-х болтов, т.е. 3-го и 4-го средних.

Для опытов была взята совершенно новая, не бывшая в употреблении, накладка.

Опыты были проведены на сквозном пассажирском пути ст. Конотоп М.-Киево-Воронежской железной дороги, лежащем на прямом участке главной линии, на площадке. Балласт песчаный, так называемый Конотопский, сильно загрязненный, какой обычно встречается на станционных путях, и имеющий по карьерному образцу по данным Механической Лаборатории Киевского Политехнического Института следующий средний гранулометрический состав:

1. — Кружно-зернистый, т.е. имеющий зерна, остающиеся на ситах с числом клеток на 1 см <sup>2</sup> :		
4 с величиной зерна больше 5 мм <sup>1)</sup> .....		0,00
16 " " " " 2,5 мм .....		0,00

<sup>1)</sup> В этой графе приведены цифры, показывающие величину зерен, проходящих через отверстия в ситах.

2. — Средне-зернистый, т.е. имеющий зерна, остающиеся на ситах с числом клеток на 1 см<sup>2</sup>:

64 с величиной зерна больше 1,25 мм.....	0,00
100 " " " 1,00 мм.....	0,16
225 " " " 0,6 мм.....	2,88
500 " " " 0,4 мм.....	15,65

3. — Мелко-зернистый, т.е. имеющий зерна, остающиеся на ситах с числом клеток на 1 см<sup>2</sup>:

900 с величиной зерна больше 0,3 мм.....	35,41
--	-------

4. — Распыленный т.е. проходящий через сита с числом клеток на 1 см<sup>2</sup>:

900 с величиной зерна менее 0,3 мм.....	45,90
---	-------

100%.

Рельсовое звено длиной в 10,68 м было уложено на 15 сосновых шпалах не одинакового поперечного сечения и имеющих в среднем следующие размеры: длина — 2,67 м, ширина нижней постели от 190 до 340 мм, что дает в среднем 262 мм, высота в 155 мм и ширина верхней постели в 150 мм. Расстояние между осями стыковых шпал  $I_1 = 540$  мм, между осями стыковой и следующей за ней шпалой одного и того же звена  $I_2 = 740$  мм, расстояние  $I_3$  между осями остальных шпал было неодинаковое, изменялось в пределах от 630 до 790 мм. На звене имелось несколько слабых старых шпал, которые как негодные были сменены весной следующего года. Путь для постановки опыта был взят в том состоянии, в каком он находился до производства опытов. Чтобы не нарушать постели балласта под шпалами, передвижка таковых для выравнивания расстояния между их осями не была сделана.

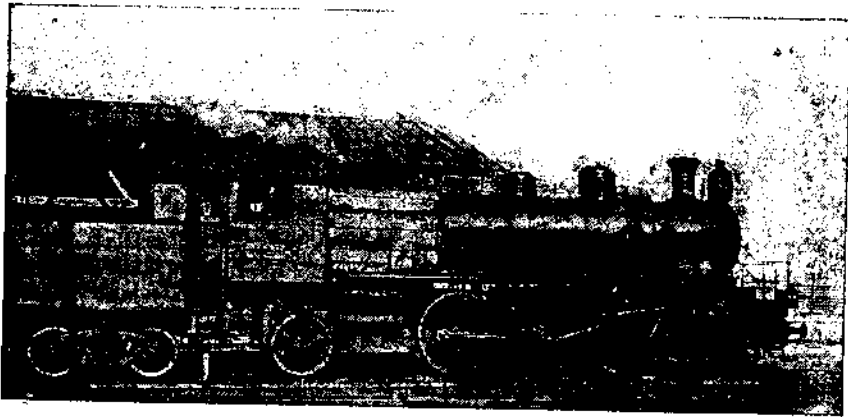


Рис. 4. Общий вид пассажирского опытного паровоза серии СУ.

Рельсы были типа III-а, 62 нов. Рос. Об. IX—904, укладки 1905 года, весом 33,48 кг м с небольшим износом. Стыковые концы рельсов были гладкие и ровные и не имели выбоин. Подкладки только на 2-х стыковых шпалах. Зазор в стыке равнялся 3,9 мм.

Для получения статической нагрузки был использован пассажирский паровоз серии СУ, типа 1—3—1, имеющий общий вес в рабочем состоянии в 86,8 тонн при теоретической нагрузке на оси: на переднюю бегунковую ось — 13,6 т, на следующие три движущие и на заднюю поддерживающую оси по 18,3 т. Нагрузка на четыре тендерные оси — по 14 т на каждую ось. Расстояние между центрами в последующем порядке осей равно 3000, 1975, 1925, 3400 мм; расстояние между центрами осей задних поддерживающих колес паровоза и первых колес тендера равно 2880 мм, а между центрами осей тендерных колес последовательно равно 1850, 1800 и 1850 мм. Общий вид паровоза виден из фотографии рис. 4.

Погода при производстве опытов была серая, осенняя. Температура около  $+ 2^{\circ} \text{C}$ . Опыты производились с паровозом, имеющим полный котел воды, при тендере с полным запасом воды и топлива.

Определение напряжений в накладке производилось при посредстве тензометров Хуггенбергера, установленных вдоль верхней кромки путевой накладки в расстоянии трех мм от верхнего ребра и вдоль нижней кромки на свисающем фартуке ее в расстоянии пяти мм от нижнего ребра, т.-е. настолько близко от края, насколько то возможно было по очертанию ребра. Как видно из фотографии рис. 5, вдоль верх-

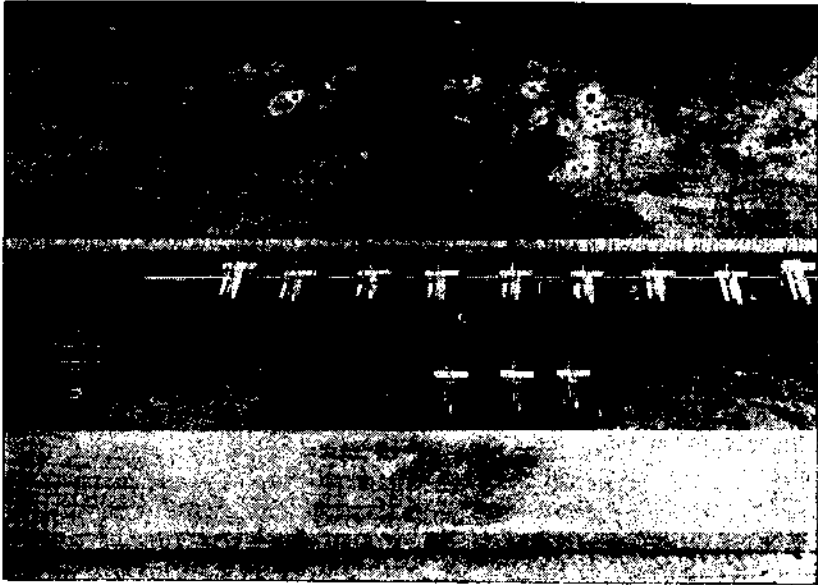


Рис. 5. Общий вид установки тензометров Хуггенбергера при удаленных 2-ом и 5-ом болтах.

ней кромки на накладке было размещено семь тензометров, расположенных симметрично от среднего сечения накладки (от стыка), по три тензометра в каждую сторону. Средний тензометр устанавливался по стыковому сечению, а каждая пара последующих тензометров размещалась влево и вправо от середины накладки на равном, около ста мм, друг от друга расстоянии. При таком расположении приборы помещались довольно близко к сечениям, проходящим через болтовые отверстия. Три нижние тензометра, установленные по кромке фартука накладки, были размещены непосредственно под тремя средними верхними тензометрами. Два тензометра были установлены на наружной боковой поверхности головки рельса над крайними вертикальными обрезками накладок по обеим сторонам стыка. В соседних двух шпальных ящиках с каждой стороны стыка, в середине промежутка между шпалами, к подошвам обоих рельсов снизу были укреплены четыре измерителя напряжений системы Окуинца для сопоставления величин напряжений, возникающих в рельсе, с напряжениями, возникающими в накладках.

Установка трех измерителей напряжений системы Окуинца и тензометров Хуггенбергера при взгляде сбоку видны на фотографии рис. 6.

По окончании установки приборов производилась совершенно тихая и плавная предварительная проводка паровоза через стык с тем, чтобы убедиться, что приборы стоят достаточно твердо, и чтобы иметь возможность проверить правильность работы приборов, наблюдая, с одной стороны, движение стрелок во время проводки паровоза, а с другой стороны, следя за возвращением стрелок на первоначальное положение.

чальное деление, принятое за начальное для отсчетов, после того как паровоз удалялся от стыка на расстояние, достаточное для выключения всех приборов и для полного перехода стыка из работающего состояния в состояние совершенного покоя.

Если при этом оказывались какие-либо неисправности в установке приборов или не было необходимой четкости в их работе, то производилось необходимое исправление, а после него—вторичная проводка паровоза.

Опыт начинался только после того, как, по проверке, работа всех приборов оказывалась вполне удовлетворительной, получалось полное возвращение стрелок всех приборов на первоначальное деление, а осмотром констатировалось, что установленные приборы были достаточно устойчивы и не сбивались со своих мест и не расшатывались после прохода паровоза. Начальные показания приборов записывались.



Рис. 6. Общий вид с боку на установку тензометров Хуггенбергера и трех измерителей напряжений системы Окуница.

В течение опытов, с целью проверки, паровоз несколько раз, время от времени, вводился на расстояние, с которого он уже не влиял на стык, и производилась проверка установки приборов и возвращения стрелок на места начальных отсчетов. Оказавшиеся отклонения стрелок записывались, дефекты установок исправлялись и опыт продолжался.

Во время самого опыта паровоз плавно и тихо подвигался на стык до тех пор, пока стрелки всех приборов находились в полном покое, но как только стрелка хотя бы у одного из приборов начинала смещаться с места первоначальной установки, то в тот же момент паровоз останавливался и производились отсчет и запись показаний по всем приборам. Затем паровоз передвигался дальше и последовательно устанавливался таким образом, чтобы центр бегунка и ось каждой совмещаемой шпалы были бы на одной вертикальной линии. Начиная же с третьей от стыка шпалы центр бегунка кроме того совмещался и с вертикалью, проходящей через середину пролета между осями двух соседних шпал, а в стыке центр бегунка, по возможности, точно устанавливался над самым стыком.

После прохода бегунка через стык установка паровоза как до, так и после третьей шпалы за стыком производилась совершенно так же, как и до прохода его через стык до тех пор, пока к третьей шпале перед стыком (по ходу паровоза) не подходило следующее по порядку колесо. С этого места ориентировка паровоза производилась уже



не только по бегунку, но, дополнительно, и по подопедному к третьей шпале колесу. Так же точно с третьей шпалы подводили к стыку и переводили через него каждое следующее колесо паровоза. Это делалось с целью иметь возможно больше точек для построения эмпирической линии напряжений.

Когда же бегунок, находясь за стыком, достигал той же по счету шпалы, с которой начиналось его воздействие на стык при начале опыта, т.-е. девятой шпалы за стыком, то местоположение его переставало интересоваться, ибо считалось, что за этой шпалой он уже не может оказывать влияние на стык, а следовательно, и влиять на показания приборов, отмечающих работу стыка.

На фотографии 7 видна установка паровоза серии Э, — при опытах на М.-Курской железной дороге, — по третьему движущему колесу над стыком.

Таким образом, при каждом полном переходе паровоза (тендер не проводился через стык, т.-е. при проходе тендера наблюдения не велись) через стык было произведено по каждому прибору от 53 до 67 отсчетов при различном положении паровоза, что дало возможность иметь довольно большое число точек для построения абсцисс и ординат, определяющих точки каждой из диаграмм напряжений накладки. В общей

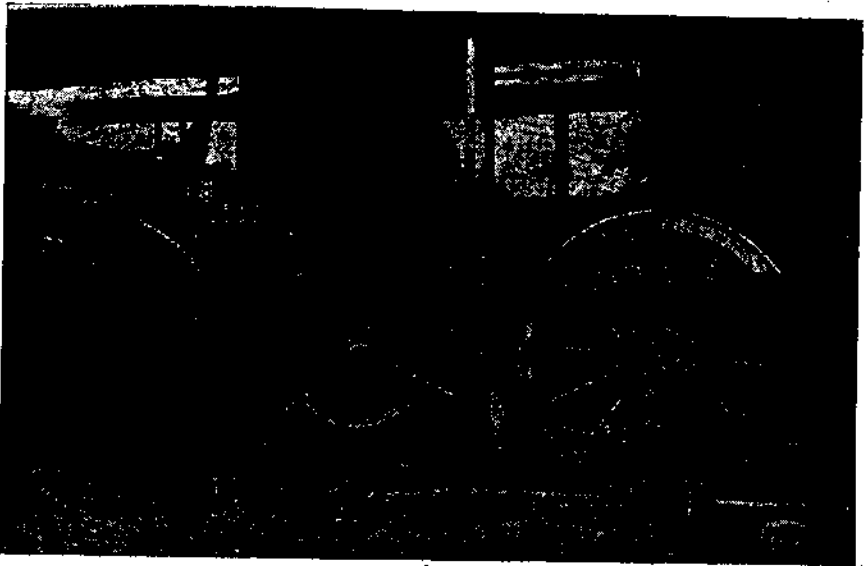


Рис. 7. Установка паровоза Э третьим движущим колесом над стыком.

сложности, при опытах на М.-Курской железной дороге, было снято 704 показания с приборов, установленных на накладке, и 128 показаний с приборов, установленных на головках обоих рельсов над концами накладок по обе их стороны, а при опытах на М.-Киево-Воронежской железной дороге было снято соответственно с первых приборов около 2450 показаний, со вторых — 484 и с измерителей напряжений Окуйяца, укрепленных на подошве рельса, — около 700 показаний.

Наблюдения для определения величин и значений напряжений прекращались по достижении задним поддерживающим колесом паровоза третьей за стыком шпалы. После того паровоз отводился на необходимое расстояние и записывалась несходимость показаний приборов с их начальными показаниями, что давало возможность определить вероятное отклонение показаний. При построении диаграмм никаких поправок не делалось, а полученная несходимость последнего показания прибора с его первоначальным показанием, переведенная в величину напряжения, нанесена на диаграмме пунктирным перпендикуляром, опущенным с последней точки диаграммы. Последняя же точка диаграммы соответствует наибольшему положительному напряжению в накладке при нахождении последнего колеса паровоза над третьей шпалой за стыком.

Из изложенного видно, что благодаря принятой установке приборов и последовательного перемещения грузов, получилась возможность не только определить величины напряжений, возникающих в накладках при различном относительно стыка положении грузов, но, зная величины и направления напряжений, одновременно возникающих в местах нахождения на накладке приборов, можно получить более или менее точное и определенное представление также и о распределении этих напряжений по накладке.

Чтобы покончить с описанием постановки опытов, скажем еще несколько слов о тензомерах Хуггенбергера.

Тензомер Хуггенбергера, имея две заостренных ножки, из которых одна неподвижная, а другая подвижная рычажная, с расстоянием между ними в 20 миллиметров, дает возможность, измеряя удлинение или укорочение заключенного между ножками прибора растягиваемого или сжимаемого под действием изгибающей нагрузки исследуемого волокна, определять напряжения в этом волокне, умножая цену одного деления тензомера на число, выражающее разность между отсчетами двух показаний стрелки по шкале: показания стрелки, прочитанного при действии нагрузки, и начального показания.

Цена одного деления определяется при градуировке прибора по формуле 
$$a = E \frac{\Delta \lambda}{L}$$
, где  $\lambda = 20$  мм — расстояние между ножками тензомера,  $\Delta \lambda$  — удлинение или укорочение, соответствующее перемещению стрелки на одно деление, и  $E$  — модуль упругости, принимаемый для рельсовой стали равным  $2150000 \text{ кг/см}^2$ . Цена одного деления различна для различных приборов и колеблется от 111,5 до  $129,7 \text{ кг/см}^2$  для тензомеров, употребляемых в описываемых опытах определения напряжений в накладках.

Измерители напряжений Окуинца построены по тому же принципу, но дают меньшую точность и имеют более крупную цену деления.

Как первый, так и второй приборы могут служить лишь для статических наблюдений.

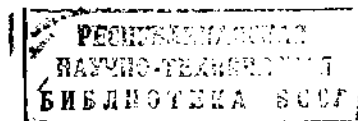
## 2. Производство опытов и построение диаграмм.

По установке и проверке тензометров и по отводе паровоза записывались начальные показания всех приборов и начиналось производство опытов. Паровоз, стоящий в достаточном отдалении, в расстоянии одного или двух звеньев от стыка, плавно, тихо и равномерно подвигался к стыку до тех пор, пока стрелки всех установленных приборов оставались в полной неподвижности и не изменяли своих начальных показаний; но лишь только тщательным наблюдением обнаруживалось хотя бы незначительное отклонение от начального деления стрелки какого-либо из приборов, паровоз останавливался и производилось наблюдение и вторичная запись показаний всех приборов. Затем делалась следующая установка паровоза. В предшествующей главе достаточно подробно изложен порядок постепенного загрузки стыка посредством последовательного перемещения паровоза.

Как выше было упомянуто, ориентировка паровоза при установке его в течение производства всех опытов делалась по переднему бегунку и при каждом опыте было сделано от 53 до 67 установок с производством отсчетов по всем приборам.

Первое заметное смещение стрелки прибора обычно наступало при переходе первого бегунка паровоза серии С<sup>У</sup> через девятую от испытываемого стыка шпалу. Таким образом, с этого расстояния начиналось действие на стык рельсов типа Ш-а паровоза серии С<sup>У</sup>,двигающегося трубой вперед, а потому удобно эту же точку пути принять за начало при отсчете расстояний до бегунка паровоза при последовательных установках паровоза и за начало координат при построении диаграмм напряжений.

Отложим от этой начальной точки по оси абсцисс все расстояния до центра бегунка при всех последовательных установках паровоза, а на перпенди-



Дер.

М 3800

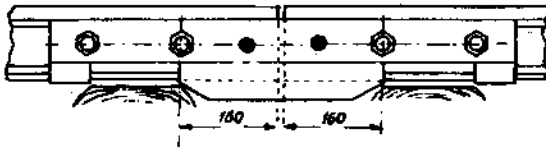
44378

кулярах, восстановленных из этих точек, отложим величины напряжений, полученных по показаниям того из приборов, который находился в исследуемом месте накладки. Соединив прямыми линиями крайние точки перпендикуляров, получим диаграмму напряжений, возникающих в данном, определенном местоположении прибора, месте накладки при различном положении паровоза по отношению к этому месту накладки.

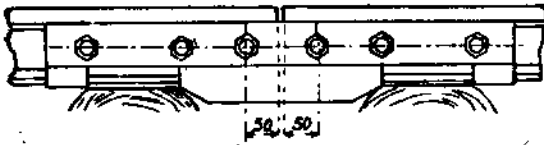
При производстве трех следующих опытных исследований:

1 — при полном числе стыковых болтов, 2 — при удалении первого и шестого крайних болтов и 3 — при удалении следующих двух болтов — второго и пятого с постановкой остальных четырех болтов, — были произведены наблюдения по определению напряжений, возникающих в накладке при последовательной передвигке через стык всех колес паровоза.

Что же касается опыта с накладкой при удалении следующей пары, т. е. 3-го и 4-го средних стыковых болтов с постановкой остальных 4 болтов, то в этом случае невозможно было произвести наблюдений для определения величин напряжений, возникающих в накладке при переходе через стык всех колес паровоза, как то было сделано при других испытаниях, а необходимо было ограничиться переходом через стык лишь первого бегунка. Такое ограничение обуславливалось тем, что вследствие увеличения расстояния между осями оставшихся двух соседних и ближайших к стыку болтов до 340 мм вместо бывшего расстояния между осями двух вынутых болтов в 120 мм, увеличивалась и возможность свободного перемещения и величина прогиба стыковых концов обоих рельсов, длина которых между менее жестко заклиненной накладкой, считая таковую до осей ближайших к стыковому зазору болтов, также увеличилась с 50 до 160 мм, принимая величину стыкового зазора в 20 мм (черт. 8).



*Стык при снятых 3 и 4 средних болтах.*



*Стык при полном числе болтов.*

Рис. 8.

Вполне понятно, что при указанных условиях уменьшается жесткость и увеличивается подвижность и изгибаемость стыкового соединения.

При новых накладках и при полном числе туго затянутых болтов создается, хотя бы на первое время до снятия накладок, более значительное трение по заклиненным поверхностям рельса и накладок. При отсутствии же средних болтов изменение направления усилий, действующих в стыке при перемещении паровоза, может вызвать сильное и резкое перемещение снизу вверх и сверху вниз стыковых концов рельсов. Очевидно, что при этом соответствен-

но изменится воздействие и на стыковые накладки.

Как показывают диаграммы напряжений, такая перемена направления действующих сил происходит каждый раз 1) при приближении груза, 2) при переходе груза через стык и 3) при удалении груза от стыка (см. диаграммы напряжений).

И конечно, чем больше вес действующего груза, тем значительнее будут размеры явления. О влиянии скорости не приходится говорить, так как в данном случае изучение стыка происходит в условиях статической нагрузки.

Опыт показал, что в этом случае уже при приближении к стыку первого движущего колеса, несущего нагрузку в  $\infty \frac{18,3}{2} \text{ т}$ , происходило расстройство стыка

в такой степени, что приборы теряли необходимую устойчивость и начинали давать явно неправильные показания.

Крайним возможным в этом случае положением, допускающим производство отсчетов по приборам, являлась установка паровоза в такое положение, при котором передний бегунок его помещался в пролете между третьей и четвертой шпалами, ближе к четвертой шпале за испытываемым стыком, т. е. в расстоянии около 2350 мм от него, а первое движущее колесо в это же время находилось по середине пролета, между первой и второй шпалами перед стыком, или было в расстоянии около 650 мм от него. Конечно, и в этом случае ослабления стыка удалением третьего и четвертого болтов, паровоз мог безопасно пройти всеми скатами через стык, но для опыта это было бы бесполезно, ибо при этом невозможно было делать отсчетов по сбитым с места и распатаным приборам.

Столь резкая чувствительность стыка, при отсутствии третьего и четвертого средних болтов, служит наглядным подтверждением совершенно очевидного положения, — особо важного значения этих болтов для устойчивости и прочности стыка.

При такой неустойчивости стыка, для получения уверенности в правильности получаемых показаний приборов, возникала необходимость чаще, чем при других опытах, прибегать к проверке правильности работы приборов.

Наиболее отдаленными между собою колесами паровоза являются первый бегунок и первое движущее колесо, имеющее нагрузку на ось в 13,6 и в 18,3 т при расстоянии между центрами в 3000 мм, а также третье движущее и заднее поддерживающее колесо, имеющие нагрузку на ось по 18,3 т при расстоянии между центрами в 3400 мм. Так как в обоих случаях расстояние между центрами указанных осей колес паровоза меньше длины пролета действия бегунка на стык, равного расстоянию между девятой промежуточной (с переходом бегунка через эту шпалу впервые обнаруживается работа стыковой накладки) и первой стыковой шпалой, что составляет примерно около 6000 мм, то очевидно, что приборы отмечают влияние не одного, а системы грузов и что построенные диаграммы при всяком положении колес паровоза являются диаграммами напряжений от системы, а не от одного груза и могут быть рассматриваемы как совмещенные инфлюэнтные линии напряжений от системы грузов.

Установка приборов дает возможность использовать один и тот же заезд паровоза для построения нескольких диаграмм напряжений, и именно столько, сколько было установлено приборов, т. е. в данном случае семь диаграмм напряжений для верхнего волокна накладки и три — для нижнего волокна фартука.

Каждая ордината этих совмещенных инфлюэнтных линий напряжений соответствует тому положению подвижной нагрузки, которое получается при совмещении бегунка паровоза с этой ординатой и дает величину и значение напряжений, возникающих в том месте накладки, где находится прибор, по показаниям которого построены ординаты рассматриваемой инфлюэнтной линии.

Поэтому для нахождения величины напряжения в одном из мест накладки, определенном положением прибора при любом положении груза, необходимо взять инфлюэнтную линию напряжений для этого прибора и расположить паровоз так, чтобы первый бегунок находился в заданной точке пути или, что тоже самое, в заданной точке абсциссы инфлюэнтной линии; тогда ордината инфлюэнтной линии, выходящая из этой точки, определит величину напряжения в данном месте накладки. Если иметь подвижную схему паровоза, то, передвигая ее по инфлюэнтной линии по оси абсцисс и ориентируя по бегунку, можно просто и легко получить полную картину изменения напряжений в данном месте накладки в зависимости от положения каждого из колес паровоза.

Также наглядно можно видеть влияние каждого из колес паровоза, если над инфлюэнтной линией построить паровоз, повернув его на 180° против того положения, которое он занимал при производстве наблюдений, т. е. при надвижке его. При этом паровоз можно расположить так (см. черт. 9, 17 и 18), что под каждым его колесом будет находиться ордината наибольших напряжений в данном месте накладки при нахождении этого же колеса над стыком.

При построении инфлюэнтных линий или диаграмм напряжений во всех тех случаях, когда имелась какие либо основания считать какое либо из отдельных показаний прибора ошибочным или совершенно невероятным, оно не принималось во внимание

при построении диаграммы и в этом месте диаграмма обрывалась. Поэтому иногда диаграммы напряжений имеют некоторые пропуски. Но так как опыт производился с возможной тщательностью, то таких пропусков немного, а где они имеются, то по аналогии с соответственными ветвями других инфлюэнтных линий, помещенных на том же чертеже, можно составить представление об общем характере выпущенной части.

Все диаграммы напряжений имеют строго экспериментальный характер.

Напряжения растяжения имеют положительный знак и построены выше нулевой линии, а напряжения сжатия—отрицательный знак и отложены ниже нулевой линии. Поэтому при изгибе накладки выпуклостью книзу, т.-е. при нахождении груза непосредственно над стыком, либо в ближайшем к стыку шпальном пролете, в верхнем волокне накладке будут возникать напряжения отрицательного знака, а в нижнем крайнем волокне фартука — положительного знака. При перемещении груза изгиб накладки изменится на обратный, сообразно чему изменят знак и напряжения, получив соответственную величину. Таким образом по диаграмме напряжений можно проследить все изгибы, получаемые накладкой при различном положении колес паровоза. В следующей главе проследим по диаграммам, как изменяются напряжения и как изгибается накладка при движении паровоза.

### 3. Исследование и сравнение диаграмм напряжений или инфлюэнтных линий.

Исследуем или сравним между собою несколько диаграмм или совмещенных инфлюэнтных линий напряжений.

Наибольший интерес имеют напряжения средней части накладки.

Из рассмотрения совмещенных инфлюэнтных линий (диаграмм) напряжений, построенных для середины верхней кромки накладке типа III-a при различном расположении болтов в дей под действием статической нагрузки паровозом серии СУ при перемещении его со стороны Киева в направлении на Курск (чертеж 9), видно, что инфлюэнтные линии, безотносительно величины напряжений, во всех случаях различного расположения болтов имеют сходственный вид и что при переходе паровозом серии СУ девятой или восьмой от стыка шпалы накладка начинает изгибаться выпуклостью кверху, т.-е. верхнее волокно накладке начинает постепенно растягиваться, а нижнее волокно фартука в то же время сжимается. По мере приближения груза к стыку изгиб накладке, а, следовательно, и напряжения, особенно в середине ее верхнего волокна, постепенно плавно возрастают, получая наибольшее значение при достижении первым колесом паровоза третьей, не доходя стыка, шпалы.

При дальнейшем движении вперед паровоза накладка начинают постепенно выпрямляться; соответственно уменьшаются и напряжения; и когда первое колесо паровоза,—бегунок,—достигает, примерно, середины первого перед стыком шпального пролета, накладка совершенно не испытывает ни изгиба, ни растягивающих, ни сжимающих напряжений и, независимо от числа (шесть или четыре) и расположения стыковых болтов, при одном и том же во всех случаях положении груза показания средних приборов имеют нулевые значения. Этим заканчивается первый изгиб накладке.

Эта установка паровоза является тем его положением, после которого, при дальнейшем движении его вперед по направлению к стыку, происходит перемена знака напряжений в накладке, получающей изгиб выпуклою поверхностью книзу, т.-е. в сторону, обратную первоначальному изгибу. При этом абсолютные значения напряжений довольно быстро возрастают и достигают наибольших числовых значений при нахождении колеса в стыковом пролете. По абсолютному значению напряжений отрицательного знака во всех случаях имеют большую величину, нежели напряжения положительного знака, т.-е. верхнее волокно вообще подвергается более сильным сжимающим, нежели растягивающим напряжениям.

Во время производства опыта при установке колеса паровоза над стыком желя тельно было расположить его так, чтобы получить при этом напряжение наибольшей величины. В стыке возможны две установки колеса. Удавалось установить колесо паровоза либо на конец одного из стыковых рельсов, примерно, в расстоянии двух сантиметров от стыкового его края, т. е. не симметрично относительно стыка, либо, если колесо не удерживалось на конце рельса, получившем от нагрузки его прогиб вниз, то оно устанавливалось над самым стыком, симметрично по отношению к нему. При

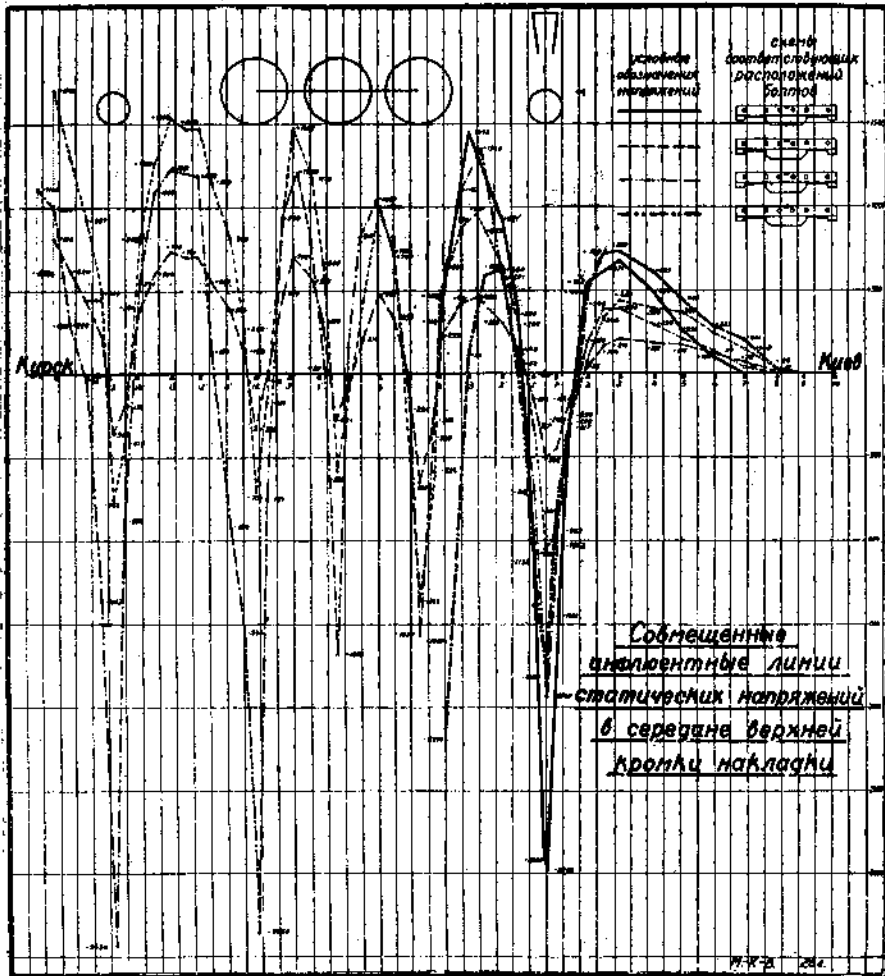
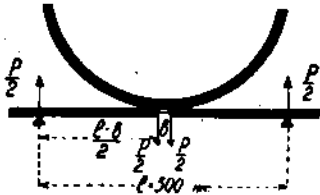


Рис. 9.

какой же из этих двух установок, как и в какой мере могут изменяться величины напряжений в накладке? Вследствие разрыва в стыке непрерывности рельса по высоте наибольший изгибающий момент в пролете, а следовательно, и наибольшее напряжение должно получиться в случае нахождения колеса не по середине стыка, т. е. не при симметричной его установке, а на одном из стыковых концов рельсов или при несимметричной установке его относительно стыка.

В первом случае (перт. 10) максимальный момент (при балке, свободно лежащей на двух опорах) равен:  $M = -\frac{P}{4} \cdot (l-b)$ , где  $P$  — нагрузка от колеса на стыковые концы обоих рельсов,  $l$  — длина стыкового пролета и  $b$  — величина стыкового зазора.

Во втором же случае, т.е. при несимметричной относительно стыка установке колеса паровоза, наибольший момент (черт. 11) равен:  $M = \frac{P}{4} (l-b) \frac{l+b}{l}$  при нагрузке на одном конце стыкового рельса. Вторая величина больше первой и отношение между ними равно  $\frac{l+b}{l} = 1 + \frac{b}{l}$  что составит не более 4% при длине пролета между стыковыми шпалами = 500 мм и при величине стыкового зазора  $b = 20$  мм.



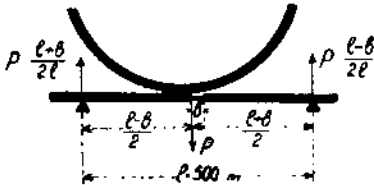
Симметричное положение колеса над стыком.

Рис. 10.

Поэтому при производстве опыта обычно допускались и считались равнозначными обе рассмотренные установки. Во всяком случае характер и направление изгиба накладки от того или иного положения колеса над стыком не изменится и будет выпуклостью вниз. Это будет второй изгиб накладки от начала движений к стыку колеса паровоза.

При дальнейшем движении вперед паровоза, по переходе переднего бегунка его за первую стыковую шпалу и по достижении им середины первого за стыком шпального пролета, т.е. при нахождении его между первой и второй за стыком шпалами, накладка вновь оказывается не изогнутой и напряжения принимают нулевые значения. От начала опыта это будет третье нулевое значение напряжений в накладке в среднем ее сечении при воздействии на стык первого бегунка.

Следующая перемена знака напряжений в верхнем волокне накладки происходит тогда, когда накладка будет вновь изгибаться выпуклостью кверху так же, как она изгибалась при приближении первого бегунка паровоза к стыку.



Не симметричное положение колеса над стыком.

Рис. 11.

Напряжения достигают наибольших значений, когда первое колесо (бегунок) паровоза располагается за серединой второго за стыком пролета, т.е. когда колесо приближается к третьей шпале за стыком, а, при наличии всех болтов, когда колесо переходит за эту шпалу. Первое движущее колесо в это время, перейдя через третью шпалу перед стыком, вступает во второй перед стыком шпальный пролет.

Следовательно, колеса паровоза располагаются так, что стык занимает, примерно, среднее положение между двумя соседними охватывающими его колесами. При дальнейшем движении вперед паровоза напряжения падают и вновь достигают нулевых значений при нахождении переднего бегунка на четвертой шпале за стыком и первого движущего колеса перед первой стыковой шпалой до стыка.

Положение бегунка легко определяется по ординатам диаграммы, а положение остальных колес может быть найдено наложением и перемещением схемы паровоза по диаграмме в направлении от Киева на Курек.

Перечисленными семью установками паровоза определяется законченный цикл действия на накладку одного проходящего через стык колеса.

Как все перечисленные, так и все последующие установки паровоза серии СУ, вызывающие попеременно то растягивающие, то сжимающие напряжения по верхнему волокну накладки, при изгибе ее можно проследить по черт. 12.

Из этих схем видно, что при переходе через стык пятискатного паровоза без тендера накладка изогнется шесть раз выпуклостью вверх, пять раз в обратную сторону,

т.-е. выпуклостью вниз, переходя двенадцать раз через нулевую линию. Следовательно, каждое колесо паровоза серии С<sup>У</sup>, благодаря совместному действию соседних колес, переходя через стык, будет вызывать в накладке лишь двойной изгиб: один — выпуклостью кверху, а другой — выпуклостью книзу, последнее же колесо паровоза, удаляясь от стыка, кроме того, вновь вызывает изгиб накладке выпуклостью вверх.

От расстояния между осями колес зависит не только число изгибов, вызываемых в накладке прохождением через стык одного колеса, но и тот промежуток времени, в течение которого этот изгиб произойдет. Можно найти такое расстояние между двумя достаточно удаленными соседними колесами, при котором каждое из них в отдельности будет производить полный законченный для одного отдельно стоящего колеса цикл изгибов накладке: двух, при приближении и удалении к стыку, изгибов выпуклостью кверху и одного, — при нахождении над стыком, — выпуклостью книзу, как то видно на схеме (черт. 13).

Сближая же расстояние между осями соседних колес, можно действие их на накладку постепенно сливать, как то видно из черт. 14. И, наконец, можно получить такое расстояние между осями соседних колес, при котором инфлюэнтная линия напряжений примет вид кривой с одной общей вершиной между ординатами отрицательных напряжений, что соответственным образом скажется и на изгибе (черт. 15).

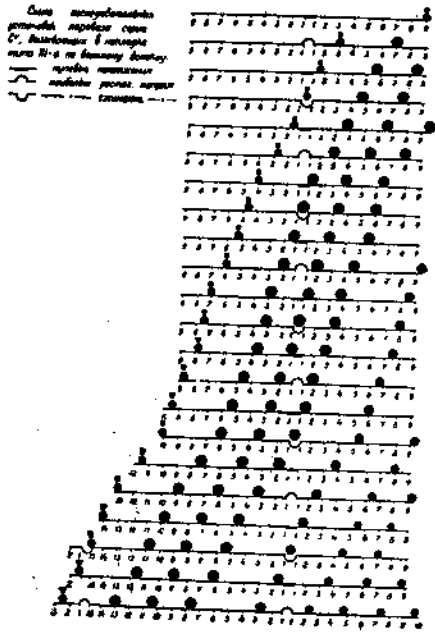


Рис 12.

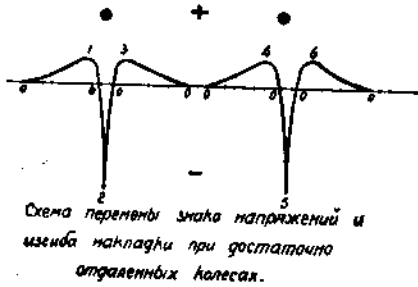


Рис. 13.

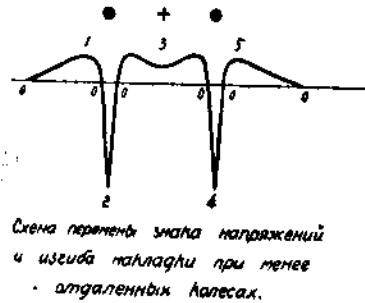


Рис. 14.

Хотя в последнем случае число изгибов, приходящихся на одно колесо, будет меньше, чем в двух предшествующих случаях, но вследствие того, что при сближенных колесах изгибы накладке будут происходить в более короткие промежутки времени, действие их на стык, при прочих равных условиях, может оказаться сильнее. Это должно, казалось бы, привести к более значительному расстройству стыка, к расслаблению скрепления, главным образом, в средней части стыкового соединения. С другой стороны, необходимо иметь в виду, что действие на путь отдельных отдаленных стоящих друг от друга грузов более значительно, чем действие их в том случае, когда они расположены возможно сближенно. Следовательно, в конечном счете, может оказаться более выгодным иметь сближенные колеса в отношении воздействия

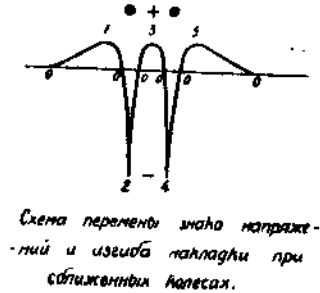


Рис. 15.

Следовательно, в конечном счете, может оказаться более выгодным иметь сближенные колеса в отношении воздействия



экипажа на стык. Это должно быть проверено и уяснено при изучении динамического воздействия поезда на стык. Здесь же ограничимся пока лишь приведенными общими соображениями и сделаем указание на то, что независимо от того, при каком из этих двух случаев действие колес на стык окажется более невыгодным, во всяком случае, наиболее чувствительным к этому воздействию будет самое слабое сечение накладки. Таковым и являются симметричные сечения, идущие от внутренних углов вырезов около фартука накладки по второй или по пятой то края болтовым дырам.

При этом, быть может, не бесполезно будет также иметь в виду, что при двадцати товарных поездах в сутки, составленных из шестидесяти вагонов каждый, и при двух от плюса к минусу переменах напряжений в накладке при переходе одной оси получается в год  $60 \times 2 \times 20 \times 365 \times 2 = 1752000$  перемен. А, как известно, при постоянных изменениях не только величины, но и знака напряжений разрушения в конце-концов происходят при напряжениях значительно меньше предела пропорциональности (С. П. Тимошенко, Курс сопротивления материалов, § 27, стр. 57, изд. 1911). Влияние же всех этих изменений значительно усиливается в том случае, если напрягаемая часть изделия имеет резкое изменение поперечного сечения. В этом случае при повторных нагрузках значительно уменьшается прочность материала.

Из изложенного можно заключить, что при проходе поездов накладка рассматриваемого типа, сечения и длины получает весьма значительное количество изгибов переменного направления, величина которых зависит от величины нагрузки на ось, а, следовательно, и от скорости движения. Влияние этих переменных изгибов должно сильнее всего сказываться на той части накладки, где имеется резкий переход в поперечном профиле ее, т. е. в местах обреза фартука и вырезов горизонтальных полок накладки по обеим сторонам фартука.

Величина напряжений в верхней кромке среднего сечения совершенно но в о й накладки при статической нагрузке достигает, для растягивающих напряжений, до  $1453 \text{ кг/см}^2$  и для местных сжимающих напряжений — до  $3438 \text{ кг/см}^2$ . (При удалении нагрузки прибор возвратился на начальное, принятое за нулевое, деление). Интересно было бы сопоставить напряжения, получаемые в верхней кромке накладки в среднем ее сечении, с напряжениями, возникающими в нижней кромке этой же вертикальной полки накладки, заклиниваемой между головками и подшвами стыковых рельсов, в месте перехода ее к горизонтальной полке, от которой спускается фартук, а также — по ребру, в месте перехода горизонтальной полки к вертикальной полке фартука. Для этого нужно было бы поставить в среднем сечении накладки один под другим четыре прибора в таком порядке: один прибор по верхней кромке вертикальной полки накладки, другой — на этой же полке, но внизу, в месте отхода от нее горизонтальной полки; третий прибор — на вершине фартука, вблизи верхнего ребра его при переходе горизонтальной полки и четвертый прибор — на нижней кромке фартука, или, кроме двух приборов, стоявших при описываемом исследовании, желательнее было бы поставить между ними еще два прибора в том же среднем вертикальном сечении. Такая установка приборов дала бы более полную картину распределения напряжений по вертикальному сечению накладки и при ней определеннее бы сказалось влияние фартука. Но для этого, с одной стороны, в момент производства опытов не было необходимых приспособлений, а, с другой стороны, не доставало приборов.

Очень интересным является рассмотрение и сопоставление диаграмм напряжений в верхней кромке (черт. 9) среднего сечения накладки с диаграммами напряжений в нижней кромке фартука, в среднем его сечении, по показаниям прибора J (черт. 16).

В нижней кромке фартука, работающей на изгиб при проходе железнодорожного экипажа, в зависимости от положения катящихся колес, будут возникать либо растягивающие, либо сжимающие напряжения, при чем растягивающие напряжения имеют большие значения, нежели сжимающие. Как те, так и другие напряжения имеют по величине относительно меньшие, а по знаку противоположные значения, нежели на-

пряжения в верхней кромке. На неравномерность работы вертикальной полки накладки и фартука и на несоответствие величины напряжений оказывает влияние то, что плоскость пары сил, изгибающей накладку, не совпадает с главной плоскостью накладки. Фартук накладки, имея довольно сильное сечение, относительно далеко отнесен в сторону от заклиненной вертикальной полки накладки, непосредственно воспринимающей нагрузку. Распределение напряжений может происходить через широкую горизонтальную полку, снабженную глубокими вырезами для перехода через шпалы. При таких условиях напряженность фартука получается значительно ослабленной. Усиливая сечение фартука и увеличивая расстояние между ним и вертикальной полкой накладки, можно все более и более уменьшать его напряженность. Наличие несоответственно расположенного и более, чем то допускается конструкцией накладки, сильного фартука оказывает вредное влияние. Практика показывает, что и данный существующий фартук мало способствует удовлетворительной работе накладки.

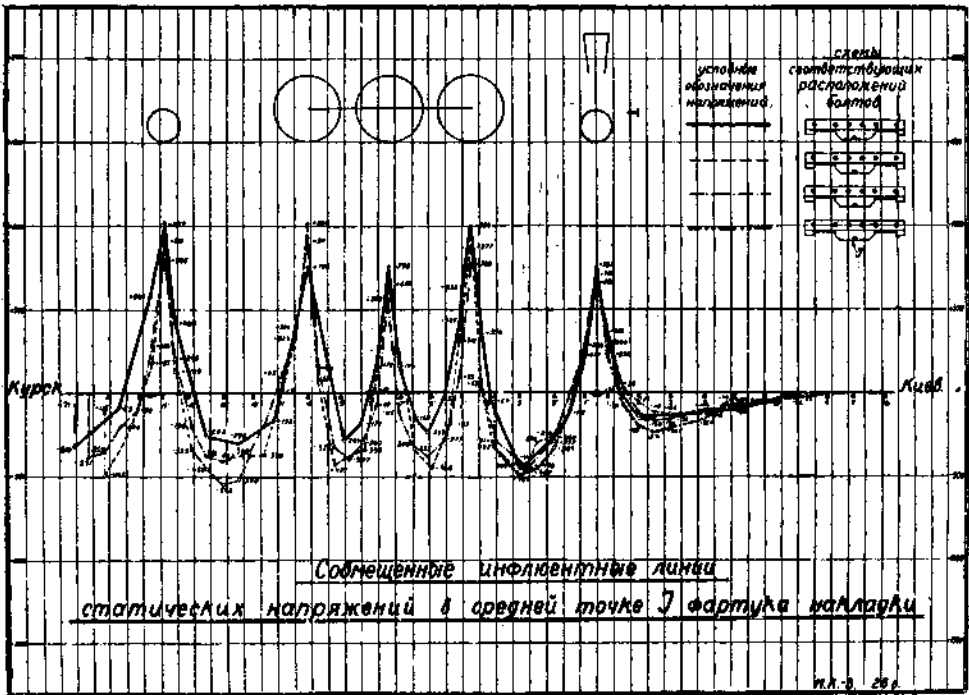


Рис. 16.

Вследствие сравнительно меньших, чем в верхней кромке накладки, напряжений, возникающих в нижней кромке фартука, работа установленных на ней приборов была более покойной, и построенная диаграмма напряжений для этой части накладки имеет вполне выдержанный характер, приближаясь по плавности линий к теоретическим диаграммам напряжений рельса. Вместе с тем особенно хорошо выявляется влияние соседних грузов.

Сравнивая между собою три диаграммы (черт. 9, 17 и 18), можно ясно видеть, как последовательно уменьшаются величины напряжений по длине накладки от середины ее к ее концам. Наибольшие напряжения получаются в среднем сечении накладки, меньшие—в расстоянии 100 мм от ее середины, в месте нахождения прибора «Е» и еще меньшие—в расстоянии 200 мм от середины, в месте нахождения прибора «В». Диаграмма, по чертежу 17, вполне удовлетворительна, и возвращение приборов в пер-

воначальное состояние было приемлемым. Если перевести в напряжения неход стрелки прибора до деления, принятого условно за нуль при начале отсчетов, то получится величина ошибок в показаниях приборов + 12, + 77 и + 91 кг/см<sup>2</sup>. Не вполне понятным является очень низкие значения напряжений под бегунком паровоза при сходе его со стыка в случае удаления третьего и четвертого накладочных болтов тем более, что во всех остальных частях эта диаграмма сохраняет вполне удовлетворительные очертания.

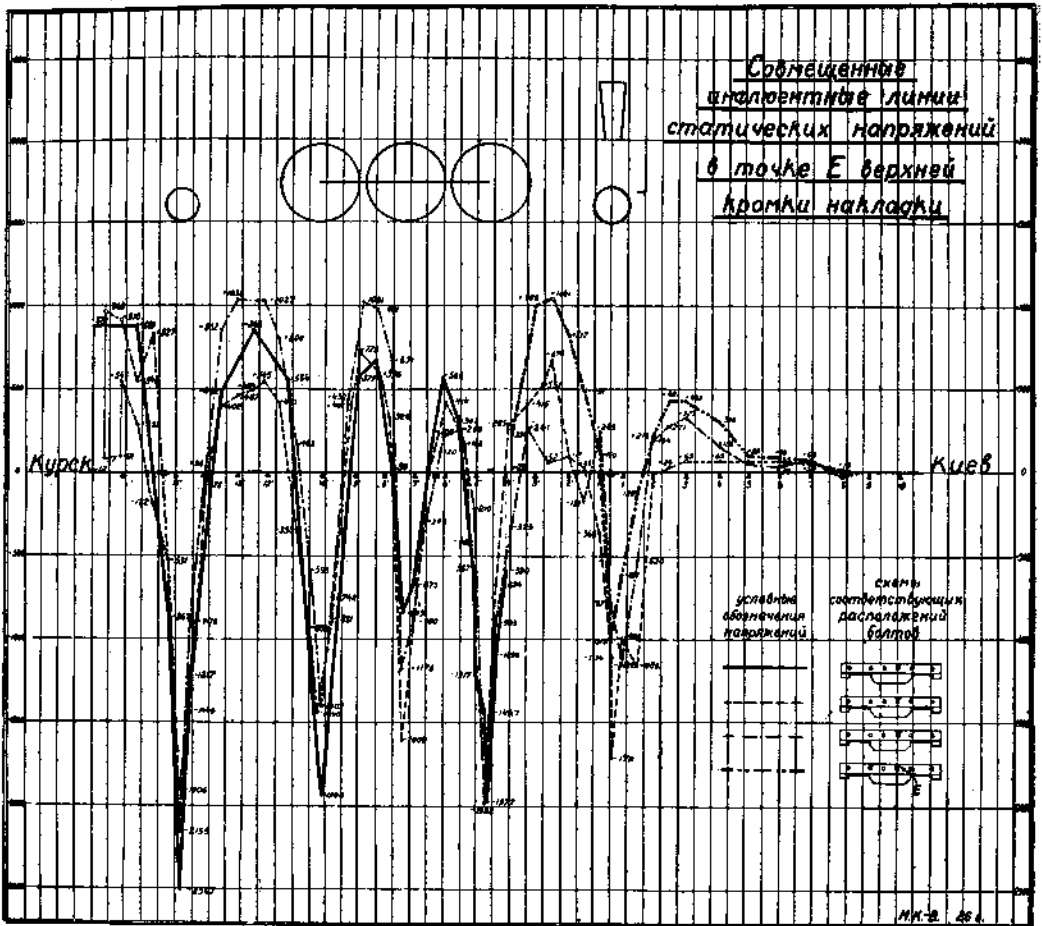


Рис. 17.

По чертежу 18 для прибора «В» правильность диаграмм для всех трех случаев различной установки болтов нарушается вполне определенно после прохода через стык третьего движущего колеса паровоза. Невозвращение приборов в начальное положение выразилось следующими величинами: — 92, + 380 и + 36 кг/см<sup>2</sup> для случаев в порядке таблицы принятых условных обозначений. Особенно заметна ошибка прибора для случая при удалении первого и шестого болтов, выразившаяся величиной в + 380 кг/см<sup>2</sup>; поэтому для получения величин наблюдаемых напряжений в этой части диаграммы, т.е. после прохода третьего движущего колеса через стык, лучше этого частью диаграммы не пользоваться.

Пользуясь диаграммами напряжений или совмещенными инфлюэнтными линиями можно построить эпюры наибольших напряжений при различном положении болтов. На чертежах 19, 20 и 21 даны такие эпюры напряжений для нескольких положений

подвижной нагрузки. По данным эпюрам можно составить представление о продольном по накладке распределении напряжений и об одновременной работе накладки при данной нагрузке. Сверху каждой эпюры помещен схематический чертеж стыка с накладкой, поставленной с таким количеством и так расположенными болтами, как то имело место при наблюдениях, давших значения напряжений для построения эпюр.

Черные кружки обозначают отверстия в стыке с вынутыми болтами.

В верхней части чертежа построены эпюры положительных и отрицательных напряжений для верхней кромки накладки, вертикальной ее полки, а в нижней—напряжения для нижней кромки фартука. Над нулевой линией эпюр напряжений в верхней кромке накладки построены растягивающие положительные напряжения, а ниже нулевой линии—сжимающие отрицательные напряжения. Для фартука—в том же порядке.

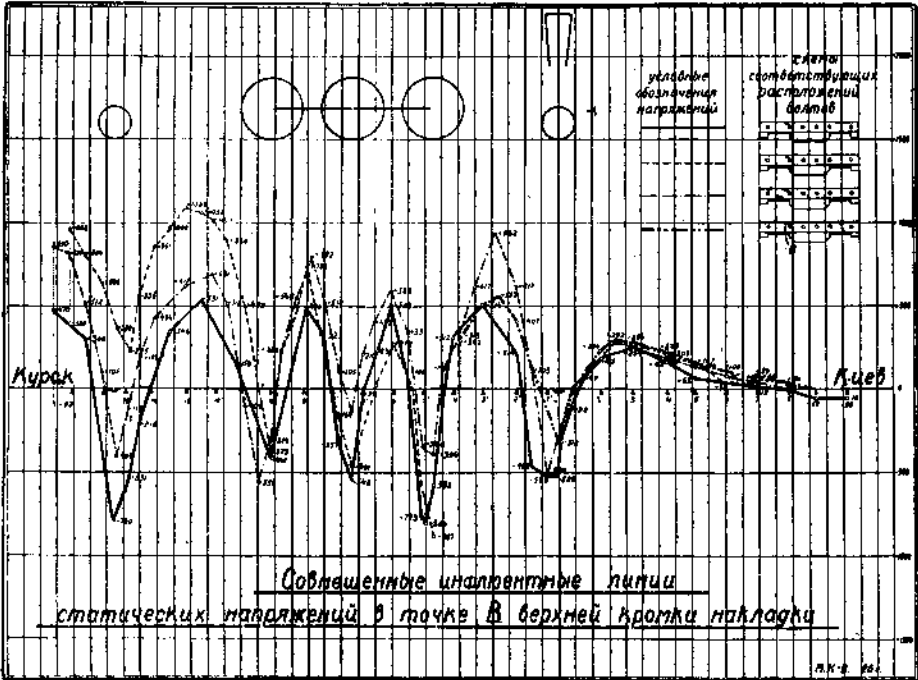


Рис. 18.

Эпюра напряжений для случая отсутствия в стыке третьего и четвертого—средних болтов не построена, так как в этом случае, как то отмечалось уже раньше, накладка работает очень неправильно.

Чтобы можно было сопоставить работу накладки при различном расположении болтов и судить о величине возникающих в накладке возможных напряжений при накатывании на стык паровоза как с правой, так и с левой стороны, построены на черт. 22 объемлющие эпюры максимальных напряжений, могущих появиться в накладке т. III-а при пропуске паровоза серии С<sup>v</sup> в оба конца.

Из этого сопоставления как бы вытекает такого рода заключение, что наличие тех или иных болтов в стыке, а следовательно, и степень их закрепления, оказывает заметное влияние на величину напряжений и на распределение их.

К диаграмме для случая, при котором в стыке отсутствовали первый и шестой болты, необходимо сделать одно замечание. Желая обеспечить возможно надежное показание прибора, стоящего в среднем сечении по длине накладки, для указанного случая прибор был переставлен ниже, чем он стоял при других наблюдениях, с тем, что

истинное напряжение в крайней кромке может быть получено посредством вычисления, принимая, что распределение напряжения по сечению подчиняется закону плоскости.



**Совмещенные эпюры максимальных статических напряжений.**

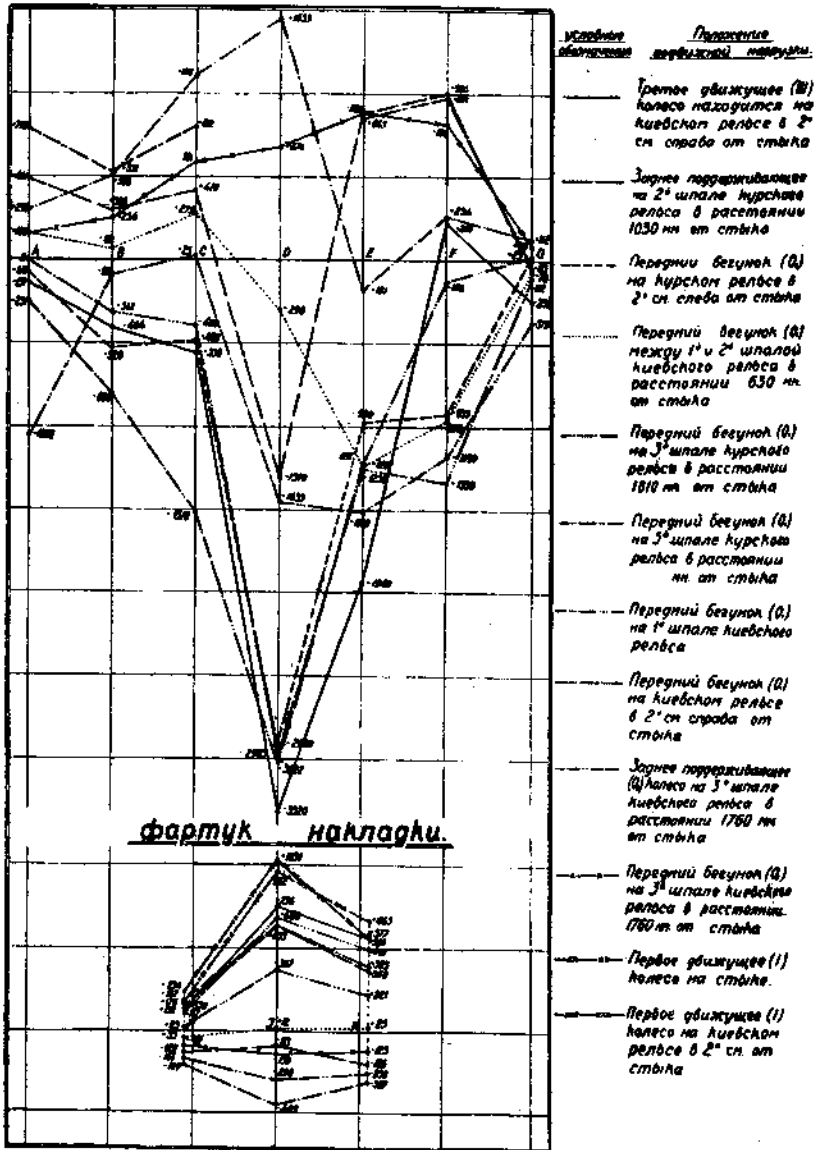
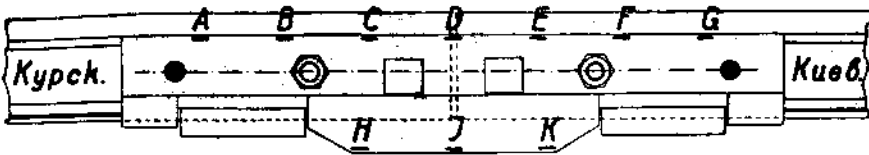
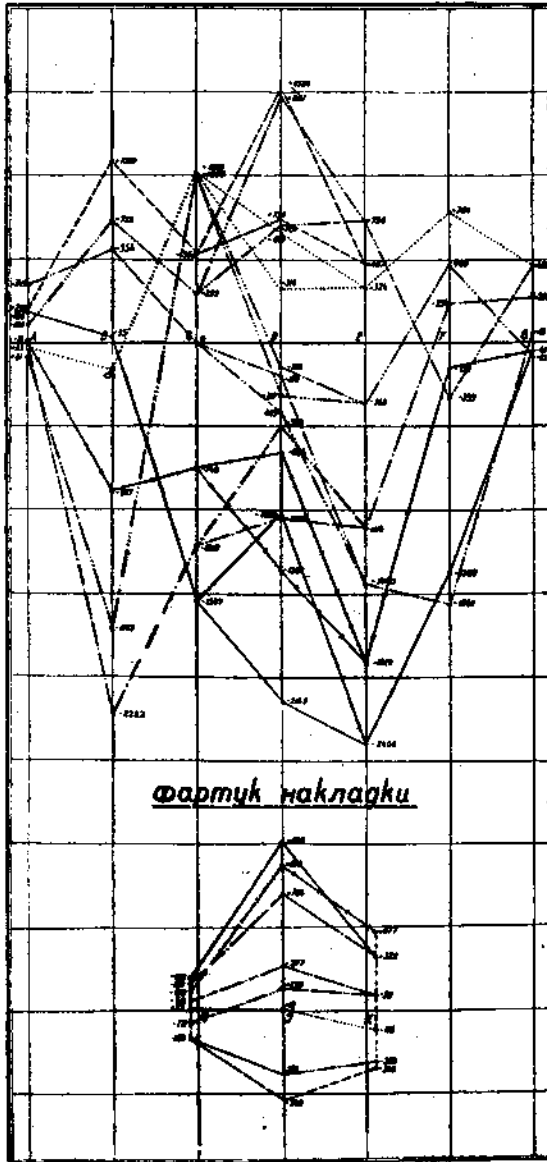


Рис. 19.

Подсчет показал, что действительные напряжения в накладке в крайнем ее волокне выше, чем получаются по расчету, а потому в средней части диаграммы для указанного

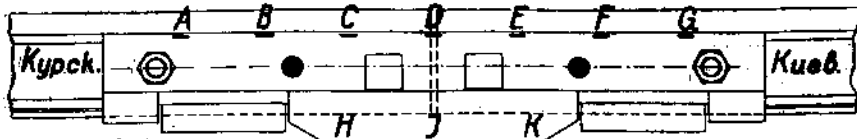


Совмещенные эпюры максимальных статических напряжений



- | <u>Условные обозначения</u> | <u>Положение подвижной нагрузки</u>   |
|-----------------------------|---|
| —                           | Третье движущее (III) колесо на стывле  |
| ---                         | Заднее поддерживающее (IV) колесо между 2 <sup>м</sup> и 3 <sup>м</sup> шпалами киевского рельса в расстоянии 1380 мм от стывла |
| —                           | Стык между вторым (II) и третьим (III) движущими колесами   |
| ---                         | Второе движущее (II) колесо на 1 <sup>м</sup> шпале курского рельса   |
| —                           | Стык между (II) вторым и третьим (III) движущими колесами   |
| ---                         | Передний бегунок (I) на стывле  |
| ---                         | Заднее поддерживающее (IV) колесо на 1 <sup>м</sup> шпале киевского рельса  |
| ---                         | Третье движущее (III) колесо на 2 <sup>м</sup> шпале киевского рельса в расстоянии 1800 мм от стывла                            |
| ---                         | Стык между вторым (II) и третьим (III) движущими колесами   |
| ---                         | Передний бегунок (I) на 1 <sup>м</sup> шпале курского рельса  |
| —                           | Первое движущее (I) колесо на стывле  |

Рис. 20.



**Совмещенные эпюры максимальных статических напряжений**

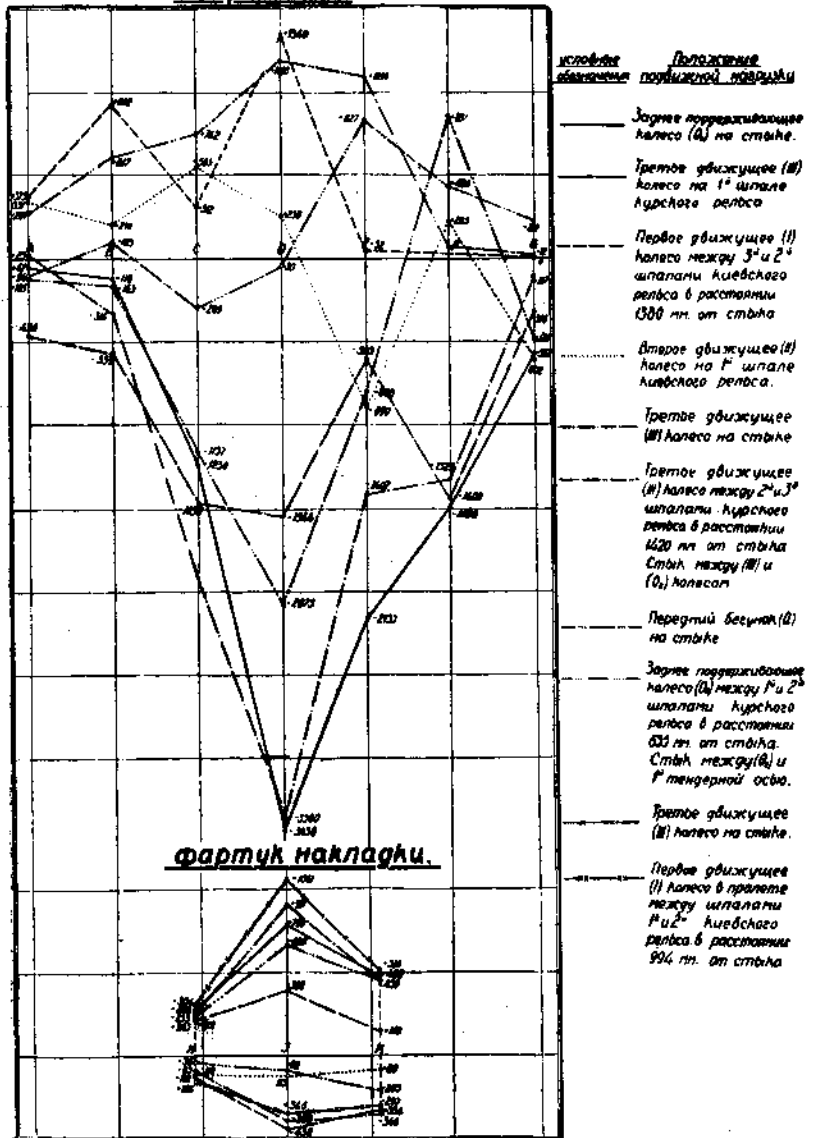
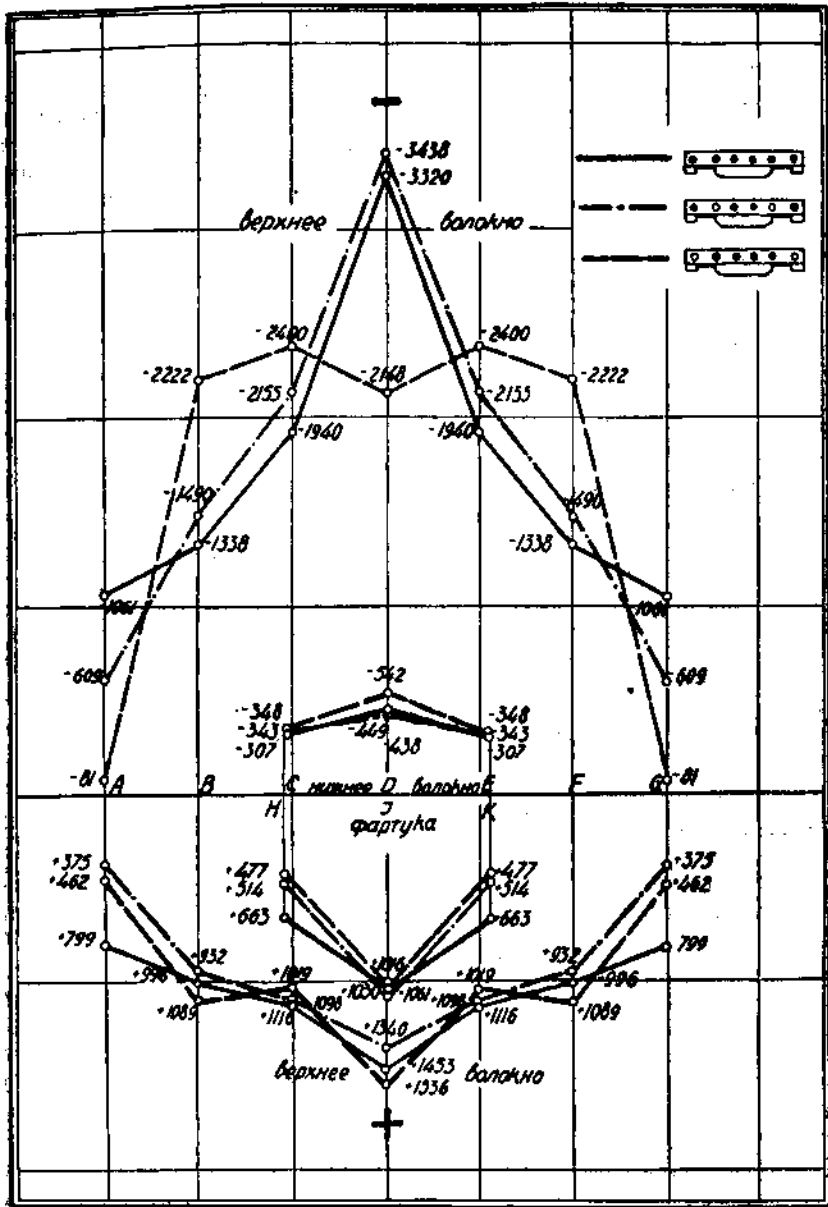


Рис. 21.



Объемлющие эпюры максимальных напряжений могущих возникнуть в накладке типа III-а при пропуске в оба направления паровоза серии Сч.

Рис. 22.



случая получился входящий угол. В действительности же эта точка должна быть несколько выше. Во всяком случае это обстоятельство не лишает возможности сделать следующие очевидные заключения при сопоставлении диаграмм.

Наибольшего значения напряжения достигают при отсутствии 2-го и 5-го болтов, а наиболее равномерное распределение напряжений в средней части, в пределах четырех средних болтов, происходит при отсутствии первого и шестого крайних болтов, что почти равносильно некоторому уменьшению длины накладки. Поэтому, видимо, более равномерно работают накладки более короткие при четырех, а не при шести болтах.

Из приведенного сопоставления и рассмотрения исключен случай отсутствия двух средних, третьего и четвертого болтов. Выше уже было обращено внимание на то, что большое значение, которое оказывают эти болты на устойчивость и на жесткость стыка; поэтому, при отсутствии их, возможно было произвести не всю серию, а лишь ограниченную часть наблюдений, что и не дает возможности произвести сопоставление напряжений при прочих равных условиях.

Если говорить о практических выводах из произведенных исследований, то можно заметить следующее.

При наблюдении за содержанием пути необходимо обращать наиболее серьезное внимание на плотное закрепление четырех средних болтов, так как при ослаблении этих болтов будет происходить более сильное расстройство стыка, чем при ослаблении двух, первого и шестого, крайних болтов. Особое внимание должно быть уделяемо двум средним; третьему и четвертому, болтам.

Ослабление крайних болтов, первого и шестого, видимо, имеет относительно небольшое значение, если это не будет вредно сказываться на работе накладки при напряжении ее силами угона пути, так как существующая накладка приспособлена для противодействия угону, тем более, что при напряжении накладки силами угона могут возникать скручивающие и выпучивающие накладки усилия.

Следовательно, при отсутствии возможности ставить стыковую накладку на все шесть болтов или при недостатке пружинных шайб в стыке предпочтительнее ставить болты и шайбы в средней части стыка, т. е. второй, третий, четвертый и пятый болты.

#### 4. Деформация и излом накладок. Характер и причина таковых.

Значительные напряжения при изгибах накладок, стоящих в пути, и большое число изломов их заставило заняться дополнительным осмотром накладок с целью изучения характера и наружного вида деформаций и излома.

В предшествующей главе было уже обращено внимание на два обстоятельства.

Во-первых, на то, что каждое колесо железнодорожного экипажа, проходящее через стык, производит минимум два изгиба накладки: один—вверх, а другой—вниз. (Черт. 12—15). При достаточно же большом расстоянии между осями соседних колес, как то видно из черт. 13 и 14, число и направление изгибов, вызываемых каждым из колес, может измениться для самого крайнего случая (черт. 15) так, что каждое колесо будет вызывать в накладке два изгиба вверх, при нахождении его перед и за стыком, и один изгиб вниз, при проходе колеса через самый стык. Общее же число изгибов накладки при сравнительно небольшом количестве поездов, проходящих в сутки, достигает относительно большого числа.

Во-вторых, на то, что верхняя и нижняя поверхности вертикальной полки накладки, особенно в местах прилегания этих полок к стыковым торцовым концам рельсов, а также и в непосредственной близости от них, подвергается столь сильному давлению, что накладка по этим поверхностям начинает деформироваться, металл начинает течь особенно сильно на верхней опорной поверхности, находящейся под давлением торцовыми частями нижних поверхностей головок рельсов.

Осмотр накладок, снятых с пути, дает возможность более подробно ознакомиться с этим вопросом.

На рис. 23 показаны размеры смятия в средней части вертикальной полки накладки под головками стыковых концов рельсов. По длине накладки смятие, с заметным уширением верхней ее поверхности, распространяется в среднем на 54—56 см не симметрично в обе стороны от середины накладки: под встречным по ходу поезда торцовым концом рельса смятие накладки происходит, насколько о том позволяет судить измерение, более значительное и на большую длину, чем под попутным концом.

Уширение смятой верхней части накладки также не одинаково. В самой середине на верхней опорной поверхности образуется в виде трехгранной призмы, положенной ребром кверху, треугольный рубец (бортик) из металла, сгоняемого ребрами торцовых обрезов головок рельса, опирающихся при изгибе в накладку и задирающими с опорной ее поверхности металл

вследствие игры и движения по ней этих торцовых концов рельсов при прогибе их под колесом, проходящим через стык.

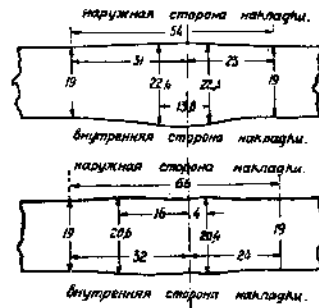
Если сделать поперечный разрез по середине деформированной накладки через этот рубец (бортик), то каждая из половин накладки будет иметь профиль, показанный на черт. 24.

Сплошной линией показана профиль, снятая с природы в середине накладки, а пунктирной линией—профиль той же накладки, снятая с поперечного сечения ее по разрезу в расстоянии 45 мм от ее середины. Из этого чертежа видно, что в средней части накладки металл сильнее течет во внутреннюю сторону, в сторону шейки рельса, чем в наружную. Очертания контуров смятых поверхностей с внутренней и наружной сторон накладки имеют различный вид.

Нижняя опорная поверхность накладки, прилегающая к верхней поверхности подошвы рельса, деформируется так же, как и только что описанная верхняя поверхность, но в значительно меньшей степени. Благодаря более слабой деформации этой поверхности на ней выступают некоторые интересные особенности. Образующийся в середине нижней опорной поверхности рубец часто проходит не по всей ширине этой поверхности, а постепенно исчезает по направлению от внутренней к наружной стороне накладки, по направлению к фартуку.

На чертеже 25 и на фотографии 26 и 27 видно, что обе скошенные, верхняя и нижняя, опорные по-

верхности соприкосновения накладок с головкой и подошвой рельса, после обработки накладки в пути проходящими поездами, приобретают совершенно гладкую, прирабо-



Средняя часть вертикальной полки накладки снятая головки стыковых концов рельсов.

Рис. 23.

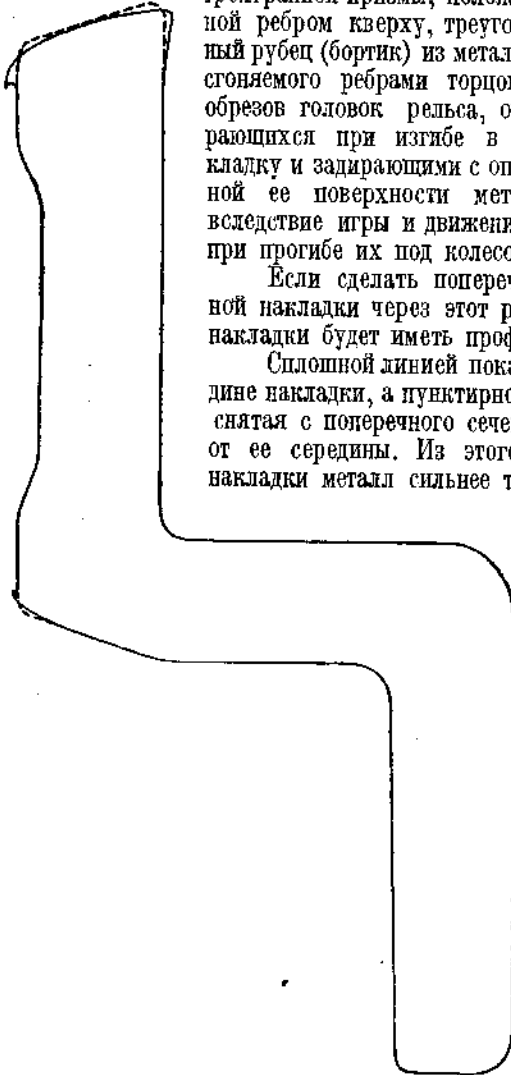
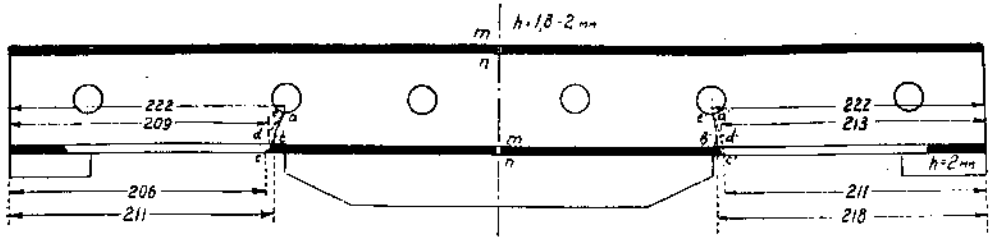


Рис. 24.

танную, как бы притертую блестящую поверхность. Верхняя сторона вертикальной заклиниваемой полки имеет притертую гладкую поверхность по всей длине накладки, а нижняя—делится на пять частей: в промежутках между первой и второй, а также между пятой и шестой болтовыми дырами опорная нижняя поверх-



- ①  $ab(\frac{222}{211\text{ мм}})$  и  $a'b'(\frac{222}{210\text{ мм}})$  трещины по вертикальной полке со внутренней стороны накладки
- ②  $bc(\frac{211}{206\text{ мм}})$  и  $b'c'(\frac{210}{211\text{ мм}})$  по опорной поверхности
- ③  $cd(\frac{206}{209\text{ мм}})$  и  $c'd'(\frac{211}{213\text{ мм}})$  по горизонтальной срезанной полке
- ④  $de(\frac{209}{223\text{ мм}})$  и  $d'e'(\frac{213}{225\text{ мм}})$  по вертикальной полке с наружной стороны накладки

В числителе даны расстояния до первых точек  $a, a'; b, b'; c, c'; d, d'$  от края накладки, а в знаменателе — вторых точек  $b, b'; c, c'; d, d'; e, e'$  от края накладки.

*тп.* — металлический рубец на границе левой и правой смятых поверхностей

Рис. 25.

ность сохраняет первоначальный шероховатый и бугорчатый вид, т.е. такой, какой имеют эти поверхности у накладок, не бывших в работе и взятых со склада, а в остальных трех частях—посередине и на концах—нижняя поверхность притерта гладко. На чертеже 25, изображающем накладку повернутой внутренней стороной к зрителю ради наглядности сглаженные, притертые места сплошь залиты тушью, а белыми оставлены те места этой поверхности (опорной), которые имеют нетронутый первоначальный вид.

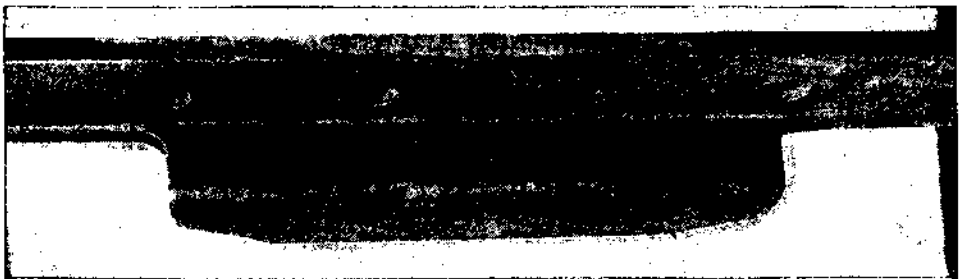


Рис. 26.

На фотографиях 26 и 27 притертость поверхностей ясно видна. На фотографии 26 верхняя поверхность накладки особенно сильно, до блеска притерта в средней части накладки.

Столь различное состояние верхней и нижней поверхностей соприкосновения накладок с рельсом может служить некоторым показателем неравномерности работы накладок в верхней и в нижней ее части и свидетельствует о том, что давление передается не одинаково на верхнюю и на нижнюю опорные поверхности и не одинаково распределяется по длине этих поверхностей.

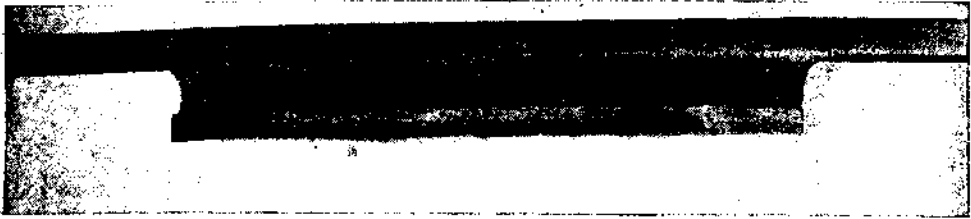


Рис. 27.

Такая неравномерность работы опорных поверхностей накладки может обуславливаться зетобразной в средней части и по концам и плоской—над шпалами формой накладки, а также очень сильным фартуком, далеко отнесенным в сторону от плоскости изгибающей пары и вертикально сжимающей (давящей) силы. Не малое значение имеет изломанная форма нейтральной оси накладки и несовпадение ее с осью рельса. Неравномерность работы является также следствием большого прозора и того, что совершенно невозможно устранить взаимное относительное, в вертикальной плоскости, перемещение рельсов и двух заклинивающих и сжимающих их соединительных накладок, происходящее при переходе колеса через стык, во-первых, потому что, неподвижность системы рассчитана лишь на силу трения болтового скрепления и клинового соединения, а во-вторых, вследствие того, что, во время движения экипажа, на накладку одновременно действуют взаимно противоположные силы: с одной стороны,—силы, направленные сверху вниз, и передающиеся на верхнюю опорную ее поверхность через головку одного рельса, а с другой стороны,—силы, действующие снизу вверх вследствие взаимодействия между нижней опорной поверхностью накладки и верхней стороной подошвы другого стыкового рельса, соединяемого этими же накладками. Направление усилий легко изменяется в процессе перемещения грузов и отчасти зависит также и от того, что взаимное перемещение рельсов и накладок, задерживаемое трением, не может быть плавным и свободным и полностью следовать за воздействием наружных сил и им соответствовать, а будет происходить толчками; поэтому накладка не будет иметь того плавного и свободного изгиба, какой она имела бы и должна иметь в том случае, если бы она могла совершенно свободно без трения изгибаться, либо если бы она была совершенно жестко соединена с рельсами в одну неизменяемую систему, когда изгибы ее точно следовали бы изгибу рельсов.

Наглядное представление об этих взаимно противоположно действующих на накладку усилиях, дают чертежи 28 и 29, на которых построены эпюры распределения напряжений по накладке под одним каким-либо произвольно выбранным и установленным грузом.

Из этих эпюр видно, что груз, действующий на стык, вызывает в различных сечениях накладки напряжения противоположных знаков. Это же можно усмотреть и из чертежей 19, 20 и 21, если проследить линию напряжений для одного из приведенных на чертежах положений грузов. Конечно, все перечисленное относится к конструктивным недостаткам накладки.

На работе фартука остановимся несколько ниже, а теперь закончим вопрос о смятии опорных поверхностей.

О смятии накладки можно судить также и по изменению величины относительного перемещения торцовых концов рельсов при проходе поездов. Для измерения таких перемещений может служить прибор Рейтлера, показанный на черт. 30.

Прибор состоит из двух частей, привинчиваемых к головкам двух смежных стыковых рельсов. К одному рельсу привинчивается коленчатый стержень, проходящий между двух штитфиков с нониусами, помещающихся в отверстиях второй скобочки, привинчиваемой к головке второго рельса. Каждый из штитфиков перемещается вдоль

Эпюры распределения напряжений в напладне.

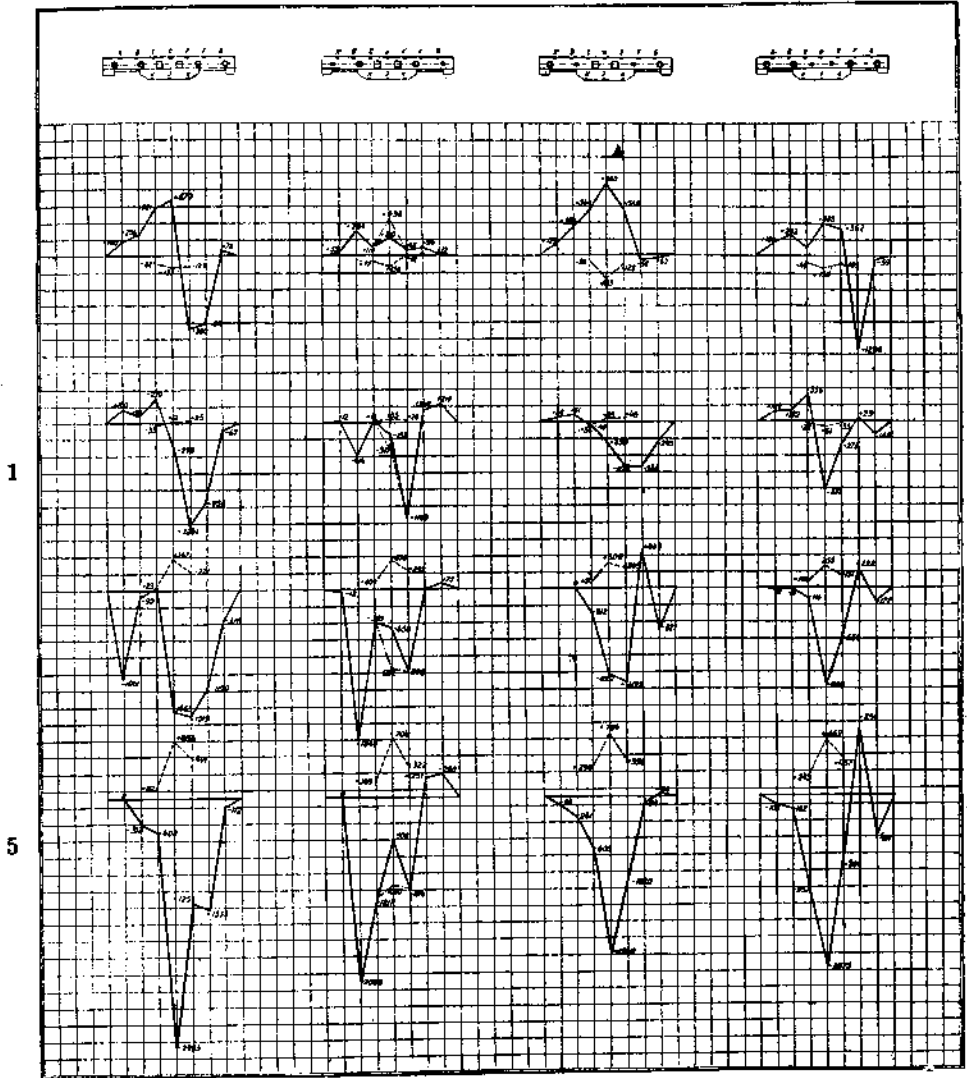


Рис. 28.

- 1) Схемы расположения стыковых болтов. 2) Передний бегунок 0 на 3-й шпале киевского рельса в расстоянии 1760 мм от стыка. 3) Передний бегунок 0 между 1-й и 2-й шпалами киевского рельса в расстоянии 630 мм от стыка. 4) Передний бегунок 0 на 1-й шпале киевского рельса. 5) Передний бегунок 0 на стыке.

шпалы. Точность нониусов равна 0,01 мм. По установке прибора оба штитфика плотно прижимаются к коленчатому стержню. При проходе колеса через стык сперва опускается конец попутного рельса, а вместе с ним и скобочка, отчего верхний штитфик, упираясь в стержень, укрепленный на встречном рельсе, передвинется вверх настолько, насколько конец попутного рельса опустится ниже конца встречного рельса. При пере-

ходе же колеса на встречный рельс, конец его прогнется больше конца попутного рельса, с которого сойдет колесо. Вместе с концом встречного рельса опустится вниз и прикрепленный к нему коленчатый стержень. Стержень нажмет на нижний штифтик и передвинет вниз его нониус вдоль шкалы. Таким образом, после прохода поезда по

Элюры распределения напряжений в накладке.

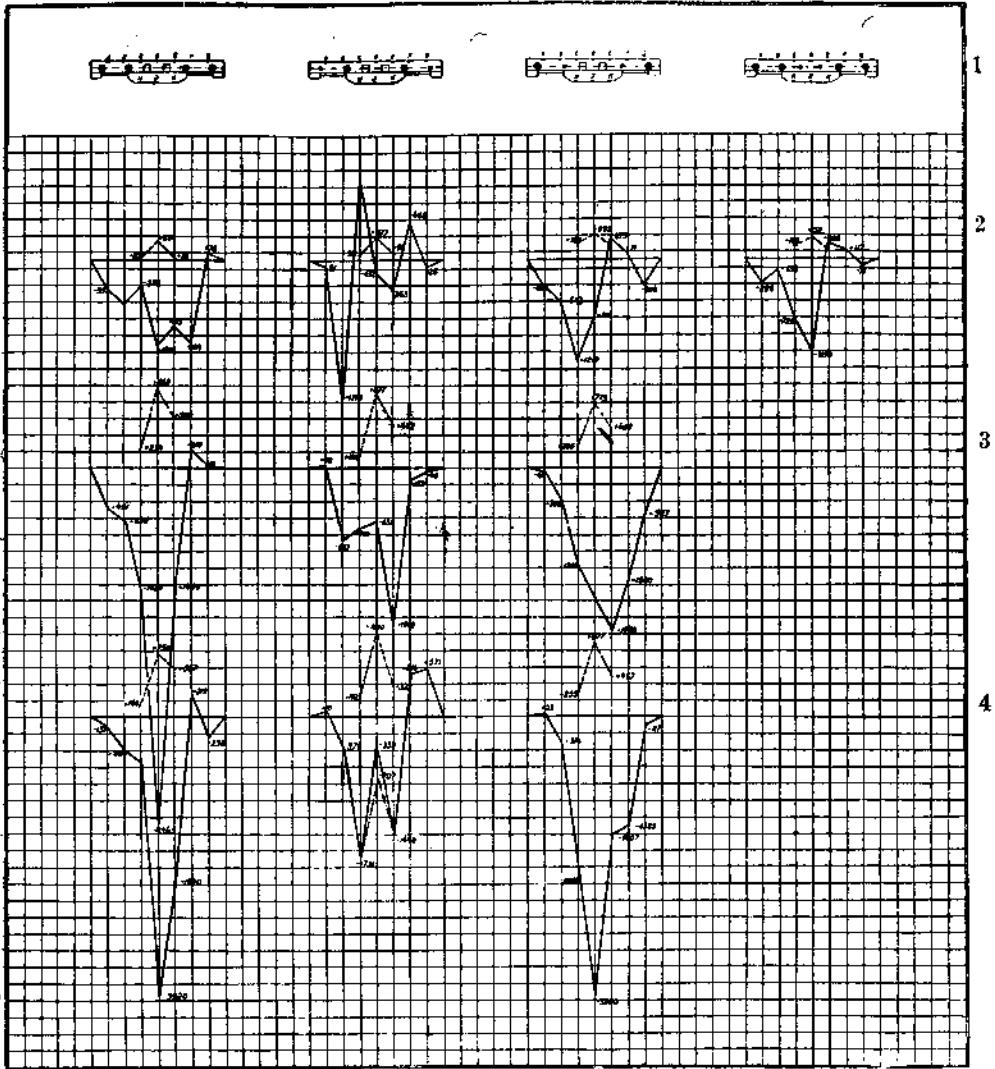


Рис. 29.

1) Схема расположения болтов на накладке. 2) Средний бегунок 0 на 1-й шпале курского рельса. 3) Первое движение I колеса на стыке. 4) Третье движущее III колесо на стыке.

обоим нониусам, — верхнего и нижнего штифтиков, можно по двум шкалам сделать отсчеты: один — для попутного, а другой — для встречного рельса. Сравнивая по каждой шкале начальные показания нониуса с полученными после прохода поезда и сделав соответственные вычитания, можно получить в сотых долях мм величины относительных перемещений торцовых концов стыковых рельсов.

Естественно, что чем тверже и жестче стыковое соединение, чем неподвижнее заклиниваются рельсы стыковыми накладками, тем меньшие величины будут показаны прибором Рейтлера. Напротив, чем большие величины будут показаны прибором Рейтлера, тем относительно более слабое сопротивление изгибу торцовых концов рельсов

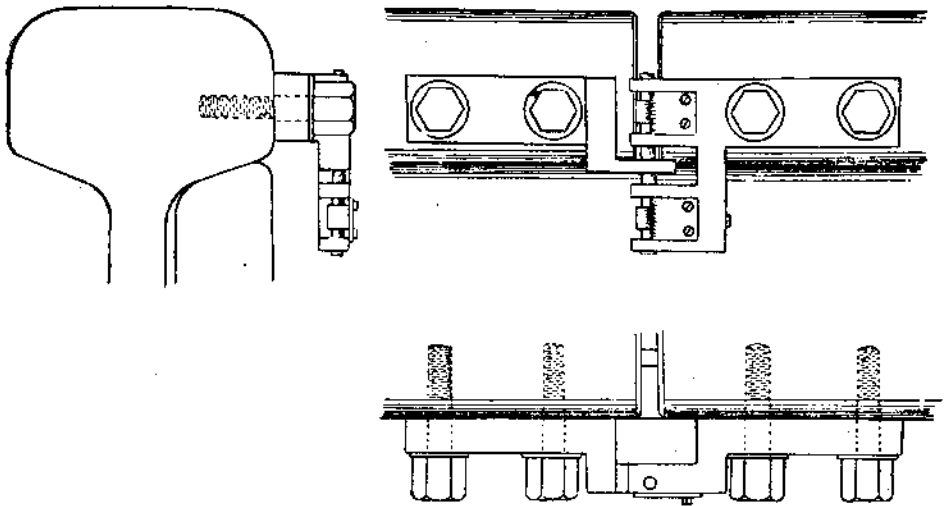


Рис. 30.

оказывает стыковая накладка. Изгиб же концов рельсов может увеличиваться вследствие деформации или местного смятия нижней поверхности головки рельса или верхней и нижней опорных поверхностей заклиниваемой между головками и подошвами рельсов вертикальной полки накладки, а также вследствие увеличения скорости и нагрузки на ось.

Для определения относительных перемещений концов рельсов в феврале 1927 года на 19-м участке Южных железных дорог было произведено несколько измерений прибором Рейтлера стыковых прогибов под проходящими поездами на замершем пути, уложенном рельсами типа III—а, как при совершенно новых накладках, так и при старых накладках, находящихся в пути во время измерений. Закрепление стыковых болтов было до начала наблюдений проверено и каждый раз перед проходом поезда стык осматривался.

Можно привести несколько отсчетов, полученных при этих наблюдениях.

Показания прибора неизменно растут, при чем показания для встречного рельса возрастают быстрее, чем для попутного и всегда превышают их. Так как движение было однопутное, то трудно уловить влияние одного направления движения.

Сопоставляя показания прибора, полученные при старых деформированных накладках, с числовыми значениями относительных перемещений торцовых концов рельсов при совершенно новых накладках, можно судить о влиянии старых изношенных накладок на смещение рельсов в стыковом соединении.

Следствием описанных деформаций является образование щелей (просветов) сверху, между головкой рельса и опорной поверхностью накладки, и снизу, между подошвой рельса и нижней опорной поверхностью вертикальной полки накладки, заклиниваемой между головкой и подошвой рельса. По мере увеличения деформации будет увеличиваться и просвет этой щели как в направлении длины накладки, так и по высоте. Понятно, что чем больших размеров достигнет эта щель, тем сильнее и резче на стык, а вместе с тем и на наладку будет действовать проходящее колесо и тем сильнее будет ударное его действие сверху вниз как при подходе к стыку по попутному рельсу, так и при перекачивании на головку встречного рельса. При подходе колеса к стыку при установке его на конце рельса попутный рельс должен будет прогнуться так, чтобы, нажимая:

Таблица показаний прибора Рейтлера.

СЕРИЯ ПАРОВОЗА	Скорость км/час	Показания прибора для		Сумма обо- их показаний в мм	Примечание
		попутного рельса в мм	встречного рельса в мм		
Щ	18	0,48	0,52	1,00	При старых стыковых накладках. Измерения производились на одном и том же стыке.
"	38	0,30	0,77	1,07	
"	38	0,34	0,88	1,22	
"	38	0,29	1,34	1,63	
"	51	0,50	1,51	2,01	
"	46	0,51	1,57	2,08*)	
ОВ	29	0,01	0,13	0,14	Показания прибора на том же стыке после установки на нем совершенно новых накладок.
Щ	58	0,06	0,21	0,27	
"	38	0,04	0,24	0,28	
"	36	0,07	0,31	0,38	

на накладку сверху, заполнить (просвет) щель, имеющуюся под головкой рельса вследствие смятия накладки, прижимая в то же время нижнюю опорную поверхность накладки к подошве соседнего встречного рельса. В следующий момент колесо переходит на встречный рельс, отчего головка его прижимается к верхней опорной поверхности накладки, а подошва отходит от нижней опорной (деформированной) поверхности накладки. Для попутного рельса будет наоборот:—головка его должна будет несколько (на величину щели) отойти от верхней опорной поверхности накладки, а подошва должна будет опереться в нижнюю поверхность накладки. Таким образом, при движении железнодорожного экипажа стыковые концы рельсов играют как клавиши, перемещаясь под колесами, в зависимости от степени и величины смятия опорных клиновидных поверхностей накладок, то вверх, то вниз, вследствие чего на накладку может действовать ударная сила, возрастающая по мере возрастания деформации накладки и смятия опорных ее поверхностей. Вместе с тем, на накладку действует срезающая сила.

Описанное явление при наличии местного смятия не может быть устранено никакими средствами, ибо никаким подвинчиванием стыковых болтов невозможно так заклинить накладку, чтобы исчезла щель от местной деформации опорных поверхностей в средней части накладки.

Помочь не могут и пластинчатые закладки.

Естественно, что этому обстоятельству необходимо придать соответственное значение и признать, что такое ударное действие, повторяющееся при проходе каждого колеса, (а на все число проходящих поездов, дающее в общем очень большое число повторных ударов), должно особенно сильно отражаться на самом слабом сечении накладки, каковыми являются места перехода фартука и горизонтальной его полки к вырезу в теле накладки, охватывающему стыковые шпалы, тем более, что это сечение сверх того еще ослаблено отверстиями для второго и пятого стыковых болтов.

«Наконец, следует кроме того обратить внимание еще на одно обстоятельство, очень понижающее способность тела накладки сопротивляться ударам. Если в каком нибудь физическом теле, например, в стержне сделать вырез в наиболее опасном месте (или в каком либо другом, что безразлично при осевой нагрузке), то уже вследствие такого ослабления поперечного сечения будет понижена способность тела сопротивляться сподойной нагрузке; но такой стержень в значительно большей степени теряет способность сопротивляться ударной нагрузке, однако, не подвергаясь немедленному разрушению. Дело в том, что сопротивление разрушению ударом зависит от той работы деформации, которая должна быть произведена до начала разрушения. Если, например, растянутый

\*) Последний отчет был взят после прохода нескольких поездов.



стержень с кольцевой заточкой подвергнуть нагрузке, то в этом месте наступит разрушение прежде, нежели остальная часть стержня успеет растянуться. Поэтому при ударе разрушения происходят при значительно меньших нагрузках.\*)

После всего изложенного становится вполне понятным, почему массовое разрушение накладок нормального типа происходит в местах вырезов накладки и идет по направлению сечения, проходящего через второе и пятое болтовые отверстия.

На фотографиях 26 и 27 снята вынутая из пути вследствие излома накладка, имеющая две трещины, идущие от места перехода фартука к вырезу у горизонтальной полки до отверстий для второго и пятого болтов, т. е. в местах обычного образования таких трещин у накладок этого типа. Обе трещины не всегда появляются одновременно и так ясно. На фотографии 26 накладка повернута к зрителю лицевой стороной, а на фотографии 27 та же накладка уложена на бок, на фартук и повернута к зрителю фартуком и нижней опорной поверхностью, которую с обеих сторон фартука пререзают две трещины.

Такие трещины, при нахождении накладки в пути, развиваются очень постепенно и последовательное появление их можно видеть по фотографиям 31—36.



Рис. 31.

Обычно накладка чаще всего снимается с пути в таком состоянии, когда совершенно развитый и явный вид имеет одна трещина, идущая к какому либо одному болтовому отверстию, чаще всего к отверстию для пятого по ходу поезда стыкового болта.

Если взять несколько накладок либо лопнув их, либо имеющих трещины (надломы) на одной стороне, и зачистить у них с другой стороны фартука симметричное место, т. е. то место, где могла бы пройти, как видно по фотографиям 26 и 27, вторая трещина, то на хорошо отполированной поверхности ясно могут вырисовываться все мельчайшие изгибы и волоски возникающие, при образовании таких трещинок.

На фотографиях 32, 33, а затем—на 34, 35 и 36 засняты с нескольких накладок, имеющих уже на одной стороне фартука доходящие до болтового отверстия трещины, зачищенные с другой стороны фартука входящие углы. По этим снимкам можно проследить постепенное развитие и распространение этих трещин.

На фотографии 31, в несколько увеличенном масштабе, снята вправо от фартука та часть выреза накладки, где впервые появляются волосные трещинки или, лучше

\*) Vorlesungen über Technische Mechanik, Dr. Phil. Dr. Ing. Aug. Föppl. Dritter Band. Festigkeitslehre., 1919, § 37, Stossweise Belastung S. 183.

сказать, надрывы верхней поверхности тела накладки. Накладка повернута к зрителю лицевой стороной, т. е. так, как она стоит в пути.

Слева в углу снимка виднеется часть фартука, а сверху чернеет вертикальная полка. Блестящая белая часть снимка представляет зачищенную и отполированную вертикальную грань горизонтальной полки при переходе ее по закруглению к фартуку в месте выреза под вторым болтовым отверстием. На этой грани видно: сверху тонкий волосок, проходящий через верхний двугранный угол; в полтора мм в сторону от нижнего конца первого волоска по середине грани видны маленькие едва заметные волоски зарождающихся трещинок, идущих к низу по тому же направлению, что и первая трещинка, проходящая через угол полки. Несомненно, что можно найти на-

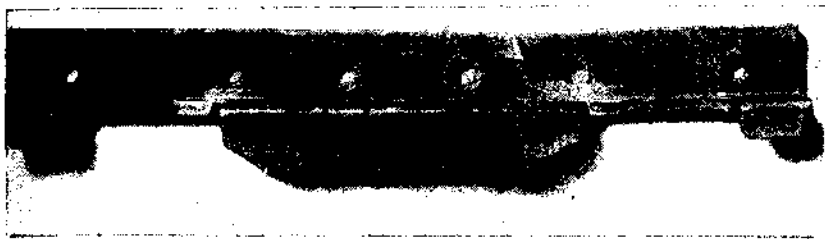


Рис. 32.

ладку с более тонкими и мелкими волосными трещинками, представляющими начальную доступную наблюдению форму возникновения трещинок. С левой стороны фартука эта накладка лопнула по пятому болтовому отверстию. Поверхности излома этой накладки видны на фотографии 37.

На фотографии 32 снята накладка, имеющая с правой стороны трещину, разросшуюся уже до пятого болтового отверстия. С левой же стороны, симметрично этой большой трещине, у фартука той же накладки, под вторым болтовым отверстием на зачищенном и отполированном месте начинают лишь развиваться отдельные разветвляющиеся волосных трещинок. На фотографии 33 видно образование двух трещинок, направ-



Рис. 33.

ленных друг к другу: одна, более длинная идет сверху вниз и прорезает верхний покров почти всей грани, а другая, очень небольшая, идет снизу вверх навстречу верхнему волоску.

Общий вид этих трещинок такой, точно они составлены из нескольких продольных волосков, изображенных на фотографии 31 посредством соединения их в один поперечными излучинами.

На следующих трех фотографиях 34, 35 и 36 показана уже более развитая следующая стадия роста трещинок в том же месте накладки. На фотографии 36 видно как уже относительно глубокая трещина прорезает нижнюю опорную поверхность вертикальной полки накладки.

Даже из этого ограниченного числа фотографий становится понятно как, постепенно развиваясь и углубляясь, первоначально едва заметные волосные излучинки соединяются в небольшую волособразную трещинку, прорезающую вначале не всю толщ,



Рис. 34.



Рис. 35.

а лишь верхний тонкий слой тела накладки. Затем эти трещинки, удлиняясь, углубляясь и постепенно соединяясь между собою, настолько увеличиваются, что составляют уже одну общую трещину, прорезающую всю толщ горизонтальной полки у входящего угла выреза при переходе ее в фартук.

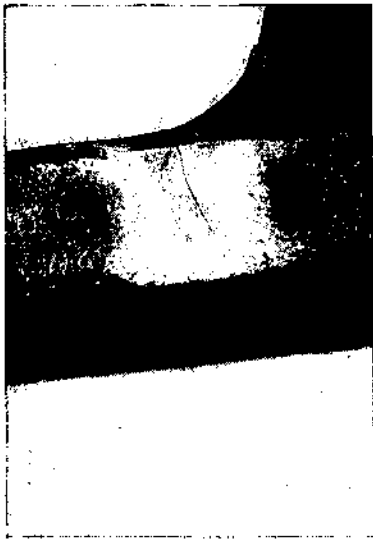


Рис. 36.

Дальнейший рост трещины, раз'единяющей вертикальную полку накладки в направлении к болтовому отверстию, происходит довольно быстро и в это время трещина имеет уже совершенно отчетливый и заметный вид. Если же и после этого оставить накладку в пути, то, несмотря на то, что трещина постепенно поднимается выше болтового отверстия, накладка все еще не ломается по всему сечению.

Излом накладки происходит внезапно после того, как живое сечение накладки окажется уже настолько ослабленным, что достаточно незначительного толчка или внезапно приложенного небольшого усилия от проходящего колеса, чтобы нарушить общее равновесие и вызвать надрыв оставшейся части накладки. Полный излом накладки задерживается упругим прогибом стыковых концов рельсов, благодаря чему надломанная накладка может совершенно не работать.

Таким образом весь ход образования и постепенного нарастания трещин во входящем углу выреза горизонтальной полки накладки не оставляет никакого сомнения в том, что весь этот процесс происходит довольно последовательно и носит следы постепенного, как то было описано выше,

образования трещин усталости, вызываемых высокими местными напряжениями при большом числе перемен. Самый же разрыв или излом части накладки, уцелевшей от этих трещин, видимо происходит при относительно очень не высоких основных напряжениях в этом сечении, так как трещины усталости способны пронизать почти все сечение от низа до самого крайнего волокна верхней опорной поверхности прежде, нежели произойдет полный разрыв накладки.



Рис. 37.

На фотографиях 37, 38 и 39 снята по излому накладка, лопнувшая в пути. На фотографиях ясно видно внешнее различие поверхностей излома вертикальной полки.

Та часть излома накладки, которая развивалась постепенно вследствие смятия и роста трещинок усталости и при образовании и существовании которых накладка, находясь в пути, еще продолжала работать, проходит от входящего угла фартука через подтовое отверстие до половины промежутка между краем болтового отверстия и верхней опорной поверхностью вертикальной полки. Излом здесь имеет гладкие раковистые, как бы притертые поверхности, обычного вида для поверхностей излома вследствие так называемой усталости металла. Остальная же очень небольшая верхняя часть сечения, получившегося вследствие внезапного одновременного излома вертикальной полки накладки, имеет вид зернистого неровного разрыва или надлома.



Рис. 38.

Обычно, как общее правило, накладка ломается лишь с одной стороны, а на другой стороне поверхность грани входящего угла покрывается лишь волосными трещинками.

Но бывают исключительные случаи, как то видно на фотографиях 26 и 27, что одновременно с одинаковой интенсивностью растут и развиваются трещины и на другой от фартука стороне. Преимущественное же появление трещин и изломов сперва на одной,

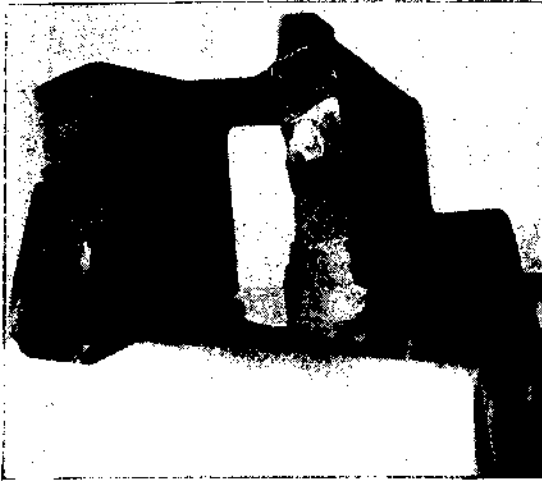


Рис. 39.

а затем на другой стороне также служит подтверждением ранее указанным соображениям о неравномерном и несимметричном распределении напряжений по длине накладки в симметричных относительно стыка сечениях ее при проходе по пути железнодорожного экипажа.

Всматриваясь в лицевую сторону накладки, видно, что болтовое крепление на стыках в этих случаях содержало удовлетворительно, количество болтов было полное и закрепление их было достаточно туго. Об этом можно судить по следам, оставленным на теле накладки шайбами пружинными, гайками и болтовыми головками. Выделенные ими места имеют

не расплывчатый, заглаженный вид, а резко очерченный отгиск по контуру шайбы, или гайки, или головки болта. Следовательно, головка и гайка олта не скользили по лицевой поверхности накладки, а плотно в'сдались в ее тело. Если сопоставить характер возникновения и образования, как то было описано выше, отдельных поверхностных волосков-трещинок, располагающихся по направлению последующего излома, последующий постепенный рост их в процессе развития и углубления посредством слияния нескольких ядом струшированных продольных трещинок в одну, гладкий раковистый вид излома и направление его по мосту наиболее невыгодного и самого слабого сечения накладки, имеющего не только глубокий и резко очерченный по контуру входящий угол, но еще значительно ослабленного большим болтовым отверстием, вследствие чего в этом углу должны возникать высокие местные напряжения, если все это сопоставить с тем количеством перемен, которое происходит при проходе обращающихся по пути поездов и если при этом еще иметь в виду и вредное, ускоряющее разрушение влияние ударов, возрастающих по мере образования и увеличения щели между опорными поверхностями рельса и заклиниваемой частью накладки, то становится совершенно понятным, почему излом накладки происходит именно по этому сечению, проходящему от входящего угла через болтовое отверстие, и возникает вследствие образования и развития трещинок усталости, постепенно раз'едающих тело накладки в указанном направлении.

Но бывают случаи возникновения трещин и по середине накладки, и идущих сверху вниз, как то показывает фотография 40.

Этот случай излома накладки можно наблюдать значительно реже нежели излом по болтовым отверстиям, описанный ранее.

Наконец, имеется возможность описать еще чрезвычайно редкий и совершенно исключительный случай совершенно разбитой накладки, видимо при ольшом зазоре. (черт. 41).

Такой излом накладки, как то можно заключить по следам от болтовых креплений и резко углубленным гнездам, (эксцентричные внешние окружности вокруг болтовых отверстий) выдавленными шайбами Гровера, и по износу опорных поверхностей накладки происходит при туго затянутых болтах и при сильном, до 1,5 мм

по высоте и по всей длине, смятия верхней опорной поверхности вертикальной полки накладки постепенно сходящем от середины к обоим концам ее.

При таком состоянии стыка вся накладка и особенно средняя ее часть, в проме-

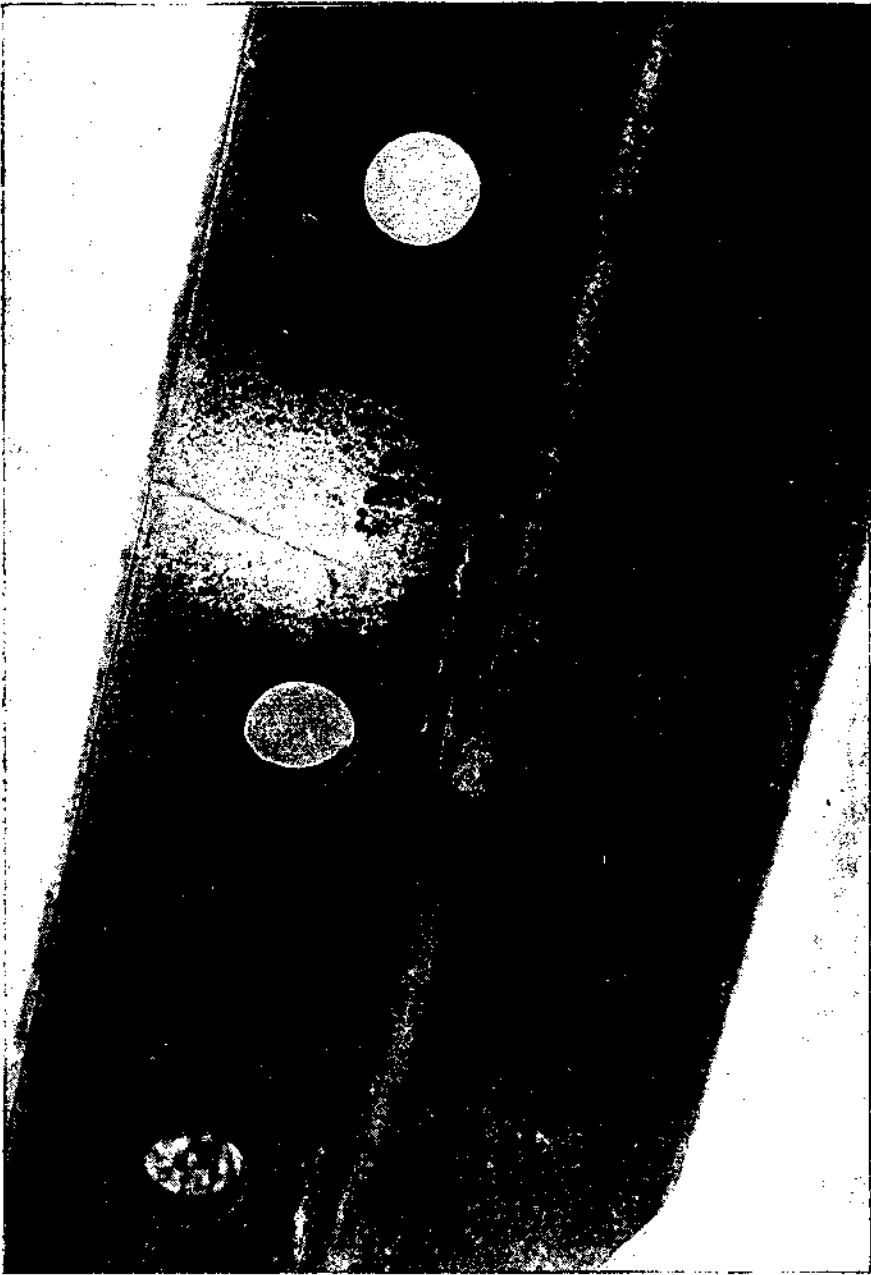


Рис. 40.

жутко между вторым и пятым болтовым отверстием, будет подвергаться действию особенно сильных разрушающих ударов. Под влиянием таких ударов происходит разрушение накладки. Описываемая накладка имеет следующие трещины: две идущие сверху

вниз, к третьему и четвертому болтовым отверстиям; от 4-го болтового отверстия к фартуку, от нижней его половины, идут 4 трещины, углубляющиеся еще на всю толщину накладке; от 3-го болтового отверстия — одна едва заметная волосная трещина идет к фартуку, а кроме того обычных два надрыва у входящих углов выреза фартука в направлении ко второму и пятому болтовым отверстиям.



Рис. 41.

### З а к л ю ч е н и е.

В предшествующем изложении в достаточной мере были освещены недостатки накладок применительно к данной конструкции. В настоящей же главе желательнее остановиться на общих условиях работы накладок общепотребительного типа, чтобы выяснить, в какой мере является правильной идея, положенная в основу данной конструкции.

Отличительной особенностью накладок рассматриваемого типа является то, что вертикальные полки их, имея наклонные опорные поверхности, заклиниваются между головкой и подошвой рельса, т. е. накладка работает как клин. Удовлетворительная работа такого клина находится в полной зависимости не только от прочности и пригонки соприкасающихся поверхностей, но и от состояния их. Накладки работают удовлетворительно лишь до тех пор, пока будет сохраняться плотное прилегание по всей длине их опорных поверхностей. Очевидно, что какова бы ни была в деталях конструкция заклиниваемой наклейки (плоская, угольная, зетообразная с фартуком) и каким бы числом болтов (четырьмя или шестью) такая накладка не зажималась бы между головкой и подошвой рельса и какой бы угол наклона не был придан соприкасающимся поверхностям (1:4, 1:3 или 1:2½), основная особенность этой конструкции рельсового стыкового соединения от того несколько не изменится, ибо сама идея такого соединения посредством упора клина наклейки под головку рельса, воспринимающего и передающего удары, является не вполне удачной.

В существующем стыке, как было указано выше, перекатывание колеса сопровождается вертикальным ударом в верхнюю часть головки встречного рельса, обращенную выпуклостью к накатывающемуся на него колесу. Вследствие такого удара заклинивая вертикальная полка наклейки, подпирать торцовые концы рельсов, служит той наковальной, на которой проходящее колесо железнодорожного экипажа сплющивает головку рельса, разбивая и самую наклейку-наковальню. Результаты такой работы колеса с достаточной наглядностью были представлены на чертежах и фотографиях предшествующей главы.

С целью более полного освещения работы стыковой наклейки, необходимо указать, что кроме смятия и излома наклейки происходит еще и стирание и задирання опорных ее поверхностей. На задиранье этих поверхностей под торцовыми концами рельсов указывает образование посредине длины этих поверхностей верхнего и нижнего бугорков (рубчиков), причина образования которых была своевременно разъяснена.

Что же касается стирания этих поверхностей вследствие скольжения их по рельсу, то об этом по аналогии можно судить об износе трущихся поверхностей накладочных пазух стыкового конца рельса.

На чертеже 42 показан стальной рельс т. 9, весом 25,76 ф.ф., прослуживший на главном пути на прямой двадцать три года: с 1902 по 8 июля 1925 года, когда он был снят вследствие излома его в стыке. Эти рельсы соединяются четырехдырными зетообразными с фартуком накладками.

Наружная линия обведена по нормальному профилю нового рельса, а внутренняя линия, со сплошной заливкой, проведена по контуру профиля изношенного рельса.

Чертеж не требует никаких дополнительных комментариев и разъяснений, давая совершенно ясную характеристику износа накладочных пазух на стыковых концах

рельсов. А так как этот износ имеет взаимный характер, то по износу рельсовых пазух можно судить и об износе опорных поверхностей накладок. Последний вид износа рельса и накладок должен еще более увеличивать щель между соприкасающимися опорными поверхностями.

Таким образом, существующий тип накладок обладает следующими недостатками:

Клинообразная поверхность накладки, подвергаясь непосредственному давлению и ударному воздействию нагрузки, теряет свою правильную форму. А потому, как вдоль всей накладки, так и в средней только ее части образуются щели между соприкасающимися поверхностями, плотным прилеганием которых только и может быть, до некоторой степени, обеспечена правильность и надежность работы стыка. В случае образования этих щелей, исправление их оказывается совершенно невозможным.

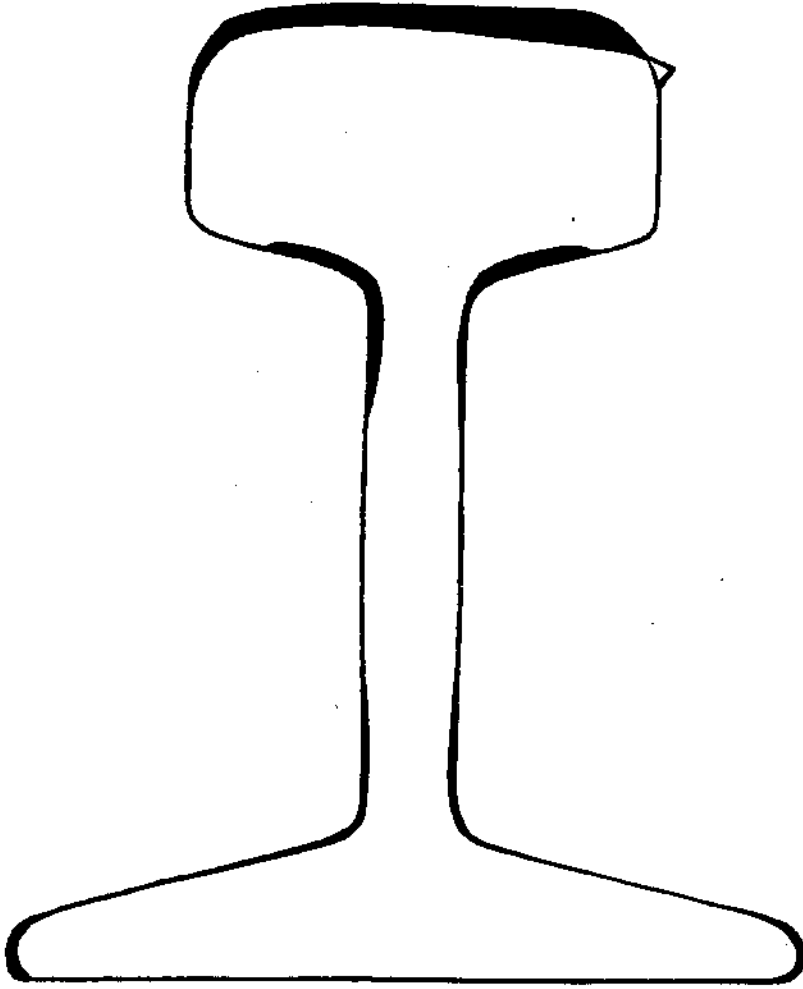


Рис. 42.

Вследствие скольжения накладок по рельсу, происходит неравномерное истирание трущихся поверхностей, распространяющееся на всю длину опорных поверхностей. Возникающее оттого ослабление стыковых болтов и плотное прилегание соприкасающихся поверхностей рельса и накладки время от времени исправляется довинчиванием болтовых гаек. Но во-первых, так как такое ослабление имеет текущий характер, а исправление производится периодически, то влияние такого ослабления сказывается постоянно. А во-вторых, наступает такая степень разработки и износа трущихся поверх-



ностей, при которой невозможно прижать накладку к рельсу настолько, что бы получилось правильное и полное заклинивание вертикальной ее полки в накладочную пазуху рельса.—Указанный вид износа накладки приводит к увеличению силы удара накатывающихся на стык колес, как при проходе его по попутному рельсу, так и при переходе его на встречный рельс. А, как выше было отмечено, удары легче всего вызывают разрушение накладок.

Наличие фартука повышает центр тяжести накладки относительно горизонтальной оси заклиненной вертикальной полки ее, вызывая повышение напряжений в верхней кромке накладки. Вследствие же изломанной и вне-осевой передачи давлений создаются условия неполного использования сечения фартука.

Длинная накладка, а, особенно, имеющая фартук, спускающийся в ящик между стыковыми шпалами, и приспособленная для принятия сил, уходящих путь, обладает еще следующими недостатками. Для перекрытия стыковых шпал требуется делать в фартуке значительный вырез, резко изменяющий профиль накладки и направление нейтральной оси и создающий крутые входящие углы, чем обуславливается неправильное распределение напряжений и возникновение высоких местных напряжений во входящих углах вырезов. При таких длинных накладках увеличиваются не только плечи изгибаемых частей, но и изгиб по наиболее ослабленным сечениям, каковыми являются те же входящие углы, находящиеся в сечении, проходящем через болтовые отверстия, что приводит, при значительном числе изгибов накладки, к образованию в этих местах трещин усталости при относительно низких общих основных напряжениях, возникающих по всему этому сечению.

Использование накладки, как противоуголочного приспособления, усиливает расстройство стыкового сечения и способствует разрыву накладки по ослабленному сечению.

Вот в общих чертах наиболее существенные особенности клинообразной накладки, имеющей несколько увеличенную длину для постановки шести дыр, снабженную очень сильным и далеко отнесенным от плоскости приложения сил фартуком и имеющую глубокие и резко очерченные вырезы, с болтовыми отверстиями, расположенными в плоскости, проходящей через эти вырезы.

Самым существенным недостатком существующего типа накладок является то, что клин этой накладки подвержен сильному местному давлению и непосредственным ударам от головок рельса. Остальные недостатки могут быть более или менее просто устранены и устраняются в различных новых конструкциях накладок той же клиновой формы.— Делаются утолщения в верхней части клина накладки, уничтожается фартук, сама накладка устраивается четырехдырной и относительно небольшой длины. Употребляются отдельно от накладок и вне стыка устанавливаемые противоугольные приспособления.

Но все это не устраняет основного недостатка клинообразной накладки—неизбежной деформации и местного смятия опорных ее поверхностей. А до тех пор пока такое смятие не будет устранено, стык не может быть достаточно прочным и устойчивым и не возможно предотвращать массовый излом накладок.

Этот основной недостаток накладки-клина давно известен и делалось несколько довольно интересных попыток, направленных к тому, чтобы получить возможно плавный переход движущегося колеса с попутного на встречный рельс. Напр., устраивались рыбообразные накладки системы Roach; эта система заслуживает того, чтобы с ней ближе ознакомиться и испытать ее на пути на дорогах Союза, ибо совершенно недостаточно американских отзывов. Если даже и не вполне оправдается сообщение о хорошей службе этой накладке и о том, что с постановкой их устраняется смятие и расщепление рельсовых концев, то во всяком случае интересна сама по себе попытка создать стык равной прочности по всей длине, несмотря на разрыв рельсовой колеи.

Наиболее интересной попыткой нам кажется применение накладок, заклинивающих подошву рельсов, т. е. попытка использовать как клин не накладку, а рельс.

Первоначальный тип этих накладок, не вполне удачный, о чем будет сказано ниже, был успешно применен на Московско-Казанской жел. дор., уложившей с 1906—

1907 года, т. е. двадцать два года тому назад, около 300 км пути из рельсов т. IV-а на накладках, заклинивающих подошву, изображенных на фотографиях 43 и 44.

Накладки, кроме вертикальной полки, входящей как клин между головкой и подошвой рельса, имеют еще каннообразную щель, плотно охватывающую подошву рельса, и тем с большей силой, чем сильнее будут затянуты стыковые болты. Нижняя поверхность вертикальной полки одновременно служит для заклинивания как вертикальной полки, так и для захватывания подошвы в горизонтальной щели.

Как показал двадцати-двух летний опыт дороги, эти накладки обладают очень большими достоинствами, как в отношении необходимой прочности, так и в отношении придания рельсовой колеи в стыке достаточной устойчивости и хорошо предохраняют от смятия стыковые концы рельсов.

С помощью этих накладок легко получается настолько сильное защемление подошвы рельсов в нижней щели, что совершенно уничтожается всякая продольная подвижность рельсов в стыковом соединении. При малой устойчивости пути в горизонтальном направлении такая неподвижность рельсов в стыке может быть не желательной во избежание возможных выпучиваний пути.

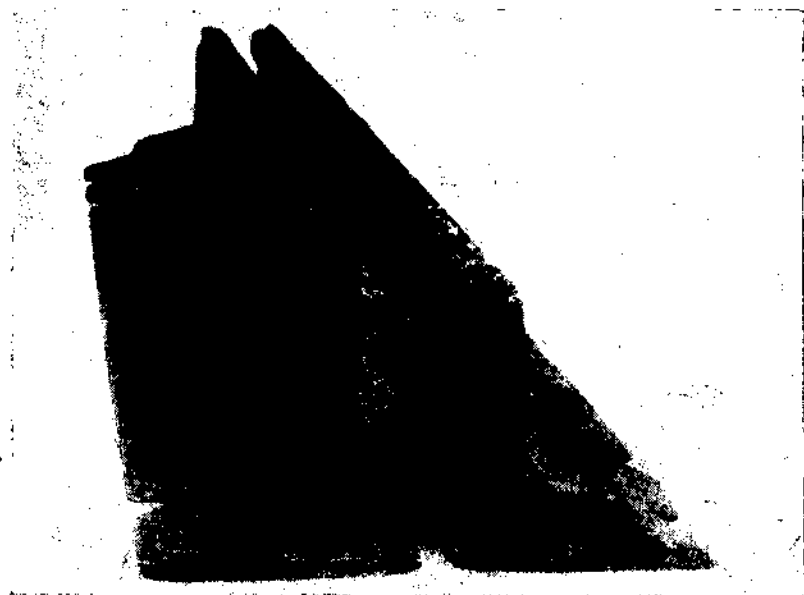


Рис. 43.

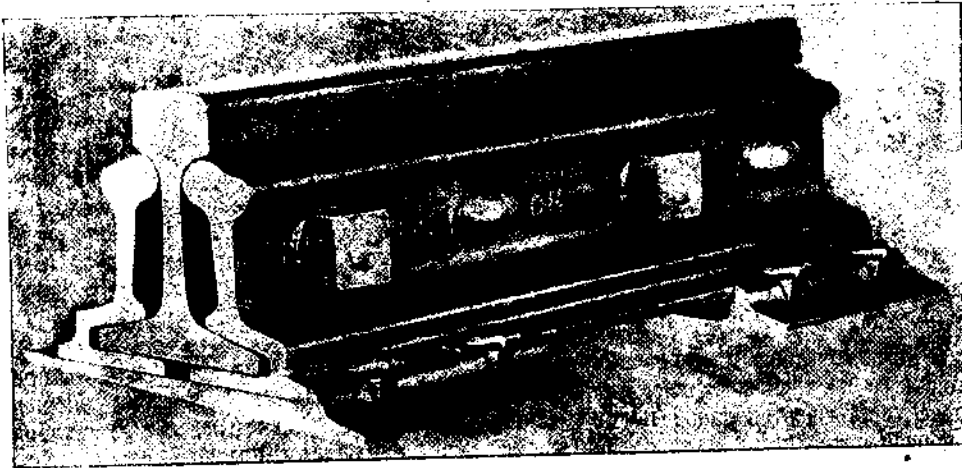
Конструктивным недостатком накладок этого типа является необходимость пригонки ее по трем поверхностям одновременного прилегания: 1) верхняя опорная поверхность вертикальной полки должна прилегать к головке рельса; 2) нижняя опорная поверхность вертикальной полки должна прилегать к подошве рельса, эта же поверхность является опорной поверхностью при заклинивании подошвы в горизонтальной щели накладки; 3) нижняя поверхность подошвы рельса, входя в щель накладки, должна прилегать к нижней поверхности этой щели. Практически невозможно получить такую идеальную выработку и пригонку, при которой достигалось бы одновременное полное прилегание накладки по трем поверхностям, а потому в действительности может оказаться две возможности: 1) либо заклинится одна подошва между горизонтальными щеками щели накладки, 2) либо произойдет заклинивание лишь одной вертикальной полки накладки между головкой и подошвой. В первом случае головка рельса не будет иметь никакой опоры, а вертикальная полка усилит лишь сечение накладки. Во втором же случае горизонтальная щель в течение некоторого времени не будет оказывать никакого влияния на работу накладки и по сути дела рассматри-

важное стыковое соединение при этой накладке ничем не будет отличаться от соединения стыка (обычными, общепотребительными накладками с одной только вертикальной полкой. Установленная и пригнанная таким образом накладка получит общую разработку вертикальной полки и местное смятие по середине. В конечном результате, благодаря общей разработке или сплошному равномерному смятию по всей опорной



Рис. 44.

поверхности накладки, получится некоторый просвет под головкой и над подошвой рельса. Подвинчивая стыковые болты, можно будет накладку настолько приблизить к рельсу, что подошва рельса плотно войдет в горизонтальную щель и заклинится между ее щеками. Это приводит к установке накладки по пункту первому, приведенному выше.



Р. с. 45.

При этом может быть, в лучшем случае, достигнуто плотное равномерное прилегание по трем поверхностям.

В случае же заклинивания одной лишь подошвы рельса, натяжение болтов будет создавать вращение накладок вокруг горизонтальной оси, проходящей по линии прилегания накладки к верху подошвы рельса, вызывая дополнительные усилия, прилагаемые к щекам горизонтальной щели накладки.

Чтобы достигнуть: 1) более правильной установки накладки, 2) не создавать дополнительных усилий при возможном вращении накладки вокруг горизонтальной ос

и 3) чтобы получить опорную поверхность для рельса при действии на его головку горизонтальных сил, в 1922 году на одной из американских жел. дорог были подвергнуты испытанию, так называемые, «свободно головчатые» (head free) накладки. (Черт. 45).

Испытание этих накладок по отзывам американцев дало вполне удовлетворительные результаты.

Отличие накладки «head free» (черт. 45) от накладки, примененной на Моск.-Казанской жел. дор. (фиг. 43, 44), заключается в том, что вертикальная полка накладки нового типа на верхней поверхности имеет цилиндрическую поверхность, построенную таким образом, что образующая этой выпуклой цилиндрической поверхности, при плотном заклинивании подошвы рельса между щеками нижней горизонтальной щели накладки, соприкасается с образующей вогнутой цилиндрической поверхности перехода головки в шейку рельса. При этом накладка устанавливается совершенно вертикально, не встречая никаких препятствий к плотному заклиниванию подошвы. Такая конструкция верхней части накладки устраняет всякую возможность к тому, чтобы вертикальная полка могла бы служить той твердой опорой под головкой рельса, которая могла бы быть уподоблена наковальне, ибо между рельсом и головкой накладки осуществляется лишь упругое соприкосновение. Головке накладки может быть придано довольно сильное сечение, позволяющее повесить центр тяжести накладки и приблизить нейтральную ось ее к нейтральной оси рельса, чем будут созданы более правильные условия работы, сравнительно с условиями работы накладок с опускающимся фартуком.

Идея этой накладки совершенно новая и по нашему мнению заслуживает полного внимания \*). Этот тип накладки является улучшенной конструкцией накладки, успешно применяющейся на Московско-Казанской жел. дороге в течение двадцати двух лет к рельсам типа IV-а \*\*).

Дорога, применяющая новый тип накладок, запроектировала и установила новый тип рельсов также «свободно головчатых» (head free). Этот тип рельсов имеет сильно скошенную нижнюю поверхность головки, что дает, по мнению дороги, возможность: 1) лучше прокатать нижнюю поверхность головки рельса, 2) создать более плавный переход головки к шейке, что важно в отношении более правильного распределения напряжений и 3) снятый материал перенести на верхнюю часть головки, т.-е. при том же весе погонного метра рельса увеличить его высоту на  $1 - 1\frac{1}{2}$  мм, увеличивая тем его момент инерции, не увеличивая веса, и создавая в  $1 - 1\frac{1}{2}$  мм запас металла для износа его при службе рельса в пути.

Касаясь этого вопроса попутно, в виду решения НКПС в настоящее время разрабатывать новые типы накладок рельсов, мы считали невозможным обойти его молчанием. Идея заслуживает экспериментального исследования и Путевое Испытательное Бюро имеет в виду заняться этим вопросом.

\*) По вопросу о службе накладок американского типа, лежащих на Московско-Казанской жел. дор., и о новом усовершенствовании типа этих накладок «head free» Комиссия Верхнего Строения Пути по журналу № 4 от 19 января 1928 г. постановила:

а) Произвести новую укладку не менее одного километра рельсов III-а Надежнинского и Сталинградского заводов с накладками американского типа М.-Казанской ж. д. на 4 болтах без костыльных шпунтов.

б) Точно также произвести опытную укладку не менее одного километра рельсов того же типа III-а и тех же заводов с теми же накладками, но выходящими, согласно последней американской конструкции вместе с подкладками. Редакция.

\*\*) Моск.-Казанская дорога получила согласие б. Инж. Совета Мин. П. С. на укладку на накладках того же типа рельсов т. III-а при постройке линии Казаль-Екатеринбург (ныне Свердловск), но война помешала осуществить заказ.

## О работе рельсов под действием статической нагрузки.

### § 1. Введение.

Изучение работы верхнего строения железнодорожного пути как в целом, так и каждого составляющего элемента его, находящегося под действием внешних сил, с параллельным определением природы и величины этих последних является для нашего железнодорожного транспорта задачей первостепенной важности. В частности, изучению работы рельсов, этого основного элемента пути, непосредственно воспринимающего на себя действие подвижной нагрузки и, следовательно, находящегося в этом отношении в самых невыгоднейших условиях работы,—должно быть уделено особенно большое внимание.

К решению поставленной задачи можно идти двояким путем: путем теоретических выводов или же путем непосредственного наблюдения над действующими на рельсы силами и над вызываемыми ими в рельсах деформациями и напряжениями.

Теоретические исследования, касающиеся работы рельсов, так же, как и других составляющих элементов верхнего строения пути, встречаются по настоящее время еще очень большие трудности. Многочисленные исследования этого порядка, проделанные проф. Н. П. Петровым, инж. А. А. Холодецким, проф. С. П. Тимошенко, Винклером, Циммерманом, Леве и другими, послужили лишь к очень приближенному решению простейших случаев этой чрезвычайно сложной задачи. Дело все в том, что такие исследования не в состоянии еще учесть все путевые факторы, могущие оказывать влияние на прочность рельсов, благодаря многочисленности их, случайности, а так же и недостаточной изученной закономерности влияния их на работу рельсов. А потому второй путь изучения работы рельсов, путь непосредственного наблюдения над ними под интересующими нас нагрузками, имеет колоссальное значение для составления правильного представления о такой работе, дает критические основания для суждения о вероятности получаемых расчетным путем по принятым в настоящее время методам данных о напряженности их, а, следовательно, дает указание и на характер необходимых изменений в этих методах расчета.

Решение последней задачи имеет, конечно, и огромное практическое значение если мы примем во внимание, что на основании расчетов по этим методам составляется представление о достаточной прочности данного верхнего строения пути на пропуск по нему определенной паровозной нагрузки.

Отсюда становится совершенно ясной необходимость в настоящее время выработки наиболее рациональных экспериментальных методов изучения работы рельсового пути.

С целью изучения работы железнодорожных рельсов, Путевым Испытательным Бюро НТК в августе и сентябре месяцах 1927 г. были поставлены первые из целого ряда намеченных к выполнению в ближайшее время опыты по определению статических и динамических напряжений в рельсах типа III-а под действием нагрузки от паровозов серий СУ и ЦУ. Для производства этих опытов был выбран рельс типа III-а, как наиболее распространенный тип на железнодорожной сети нашего Союза. Статические напряжения в рельсах определялись в данном сечении его при различных положениях по отношению этого сечения неподвижно стоящего паровоза. Динамические напряжения в тех-же рельсах определялись под паровозами тех же серий, следовавших с поездными составами. Такое параллельное определение напряжений в рельсах под указанными двумя видами нагрузок чрезвычайно ценно, так как этот двойной метод наблюдений дает возможность их сопоставления, чем достигается лучшее выявление всех особенностей динамического воздействия на рельс подвижной нагрузки по сравнению с нагрузкой, находящейся в состоянии покоя.

В задачу настоящей работы и входит познакомить со всем цифровым материалом и намечающимися выводами о работе рельсов типа III-а под действием статической нагрузки паровозом серии СУ, в условиях работы рельсового пути на М.-Киево-Воронежской жел. дороге. Что же касается наблюдений, проделанных Путевым Испытательным Бюро над определением динамических напряжений в рельсах под подвижной нагрузкой, то весь цифровой материал, касающийся наблюдений этого рода, находится в настоящее время в стадии проработки и результаты таковой будут опубликованы в одном из ближайших выпусков НТК.

Прежде чем перейти к описанию проделанных статических опытов, необходимо отметить, что эти последние имеют еще, конечно, предварительный характер. При производстве их ставилась, главным образом, цель выработки наиболее рациональных методов производства наблюдений такого рода. И в этом отношении достигнуты определенные результаты. В ближайшее же время Путевым Бюро предполагается эти опыты повторить для тех же типов рельсов в более уточненном виде, учтя весь приобретенный опыт по предшествующим работам.

## § 2. Описание опытов.

Наблюдения по определению статических напряжений в рельсах типа III-а производились Путевым Испытательным Бюро с 12 по 16 сентября 1927 года в 6 верстах от станции Контотп на территории путевого опытного участка М.-Киево-Воронежской железной дороги. Для этих опытов был использован закрытый раз'езд 210 километра двухпутной линии этой дороги Киев—Воронеж.

Под наблюдение было взято (см. фиг. № 1) рельсовое звено (отмеченное на чертеже жирной линией) главного пути II, статически нагружаемое испытательным паровозом.

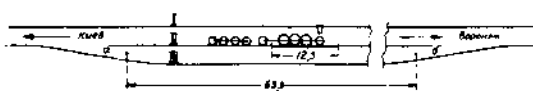


Рис. 1.

Для того чтобы движение по линии на время производства опыта не прерывалось, в обход участка а—б этого пути, длиною в пять рельсовых звеньев, был специально для опытов Путевого Бюро, в дополнение к двум существующим на раз'езде главным путям I и II, уложен для пропуска поездов обходный путь III. На указанное время этот обход и включался в главный путь II; концы же участка а—б этого последнего на то же время размыкались. Этот момент и представлен схематично на фиг. № 1. На все остальное время, свободное от опытов, движение опять переводилось на главный путь II. Такой постановкой опыта достигалось то, что на одном и том же участке а—б главного пути II, а, следовательно, над одним и тем же верхним строением пути можно было провести параллельные наблюдения над работой рельсов как под действием статической, так и под действием динамической нагрузок, чем и достигалась возможность последующего сопоставления влияния этих нагрузок на один и тот же путь в его естественном состоянии.

Отведенный для производства наблюдений участок главного пути II месяца за три до момента начала этих опытов был приведен в принятое для данной линии нормальное по техническим условиям состояние, при чем это требование было проведено по отношению всех элементов верхнего строения пути.

С этой целью на испытуемом участке были уложены неизношенные рельсы типа III-а (Югосталь, Д.Г.З. 1926—XI), длиною в 12,5 м, на подкладках, имеющих на всех шпалах.

Шпалы сосновые, новые, брусковые, длиною 2,72 м, с поперечным сечением, строго выдержанным по принятому для опытов нормальному типу шпал № I, при ширине нижней постели в 25,5 см и высоте в 16,0 см. Уложены они были 1/VI—1927 г. и затем подбиты сплошь 2/VI и 29/VIII—27 г. Расстояние между осями их к моменту производства опыта указано на фиг. № 2.

Обращают на себя внимание некоторые отступления от нормы, наблюдаемые в этих расстояниях между осями шпал испытываемого рельсового звена, которые могут быть объяснены сдвигками их, происшедшими за время движения поездов с момента указанного первоначального приведения пути в нормальный вид до момента начала производства опыта. При этом перегонку шпал перед самым опытом решено было не производить с тем, чтобы не потревожить нижней постели их. При расчетах расстояние между осями шпал в среднем принималось равным 720 мм.

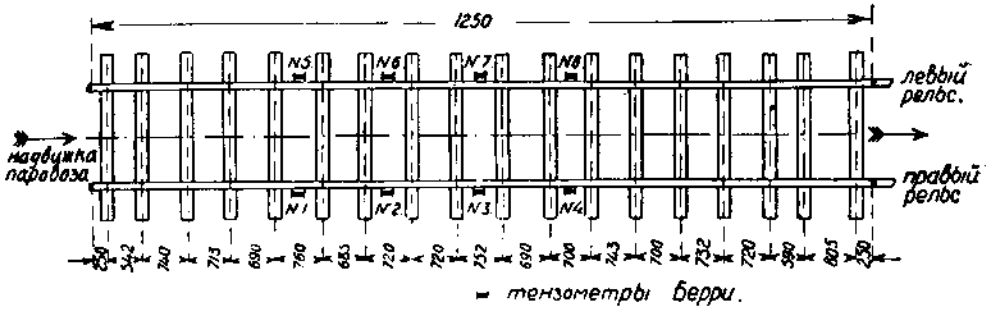


Рис. 2.

Балласт — Конотопского карьера. Характеристика его по материалам испытаний заведывающего Механической Лабораторией Киевского Политехнического Института проф. К. К. Симинского, произведенных им по заказу Управления М.-Киево-Воронежской жел. дороги, и любезно предоставленных им в пользование Путевому Бюро, приведены в таблице № 1. Толщина балластного слоя, считая до подошвы шпалы, была равна 18 мм.

Путь был расположен на насыпи высотой в 1,5 м, состоящей из смеси песка с растительной землей.

Таблица № 1.

Сведения о балласте Конотопского карьера по данным испытания Механической Лаборатории Киевского Политехнического Института.

№№ по ряду	НАИМЕНОВАНИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ	Числовое значение характеристики	Примечание
1	Удельный вес. . . . .	2,630	Определено с помощью прибора Лешателье—Кавдао.
3	Вес одного метра:		
	1) в разрыхленном состоянии . . . . .	1493г	
	2) в уплотненном . . . . .	1760г	
3	Коэффициент пористости:		По формуле:
	1) в уплотненном состоянии . . . . .	33,0	$n = \frac{Y - B}{Y} \times 100.$
	2) в разрыхленном . . . . .	43,2	где Y—удельный вес, B—вес 61 см <sup>3</sup> балласта

№№ по порядку	НАИМЕНОВАНИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ	Числовые значения характеристики	Примечание
4	<p align="center">Гранулометрический состав балласта:</p> 1) число отверстий сита 4 . . . . . 2) " " " 16 . . . . . 3) " " " 64 . . . . . 4) " " " 100 . . . . . 5) " " " 225 . . . . . 6) " " " 500 . . . . . 7) " " " 900 . . . . . 8) Распыленный . . . . .	0,00 0,00 0,00 0,16 2,18 15,65 35,41 45,90	<p>Получается путем просеивания на проводочных ситах на установке типа Тетмаера.</p> <p>Гранулометрические составляющие выражены в процентах по весу.</p>
5	<p align="center">Зернистость песка на основании гранулометрического состава его:</p> 1) крупнозернистого песка . . . . . 2) среднезернистого " . . . . . 3) мелкозернистого " . . . . . 4) распыленного " . . . . .	0,00 18,69 35,41 45,90	<p>Песок задержавшийся на сите № 1 и 2.</p> <p>Песок задержавшийся на сите № 3, 4, 5 и 6.</p> <p>Песок задержавшийся на сите № 7.</p> <p>Песок, прошедший последнее сито.</p>
6	Коэффициент зернистости . . . . .	34,16	<p>Сумма произведений весовых процентов на число клеток на 1см<sup>2</sup> соответствующих сит, разделенное на сумму числа клеток на 1см<sup>2</sup> для всех сит.</p>
7	Угол естественного откоса . . . . .	32,5°	
8	Минералогический состав . . . . .		<p>Мелко-равномерный зернистый песок серого цвета. Состоит из прозрачных сероватых зерен кварца, изредка встречается кварц черный и розоватый. Зерна большей частью имеют хорошо округленную форму с блестящей гладкой поверхностью, реже встречаются угловатые зерна с неровной поверхностью.</p> <p>Глинистого вещества 1,10%, оно распылено между зёрнами кварца.</p> <p>Растворимость равна нулю. Органических примесей нет.</p>



Статическая нагрузка на рельс получалась под действием полногрузного паровоза серии СУ № 96—67 с тендером (см. фиг. № 3).

Перед производством опытов паровоз был взвешен на весах, дающих возможность определить нагрузки, приходящиеся на каждое колесо его. В таблице № II приведены результаты этого взвешивания, а также указаны и расстояния между осями этого паровоза, и отношение этих величин к принятому среднему расстоянию между осями шпал в 720 мм.

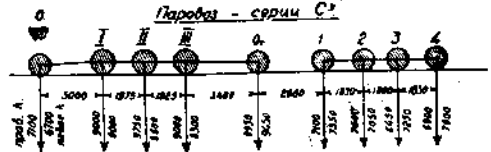


Рис. 3.

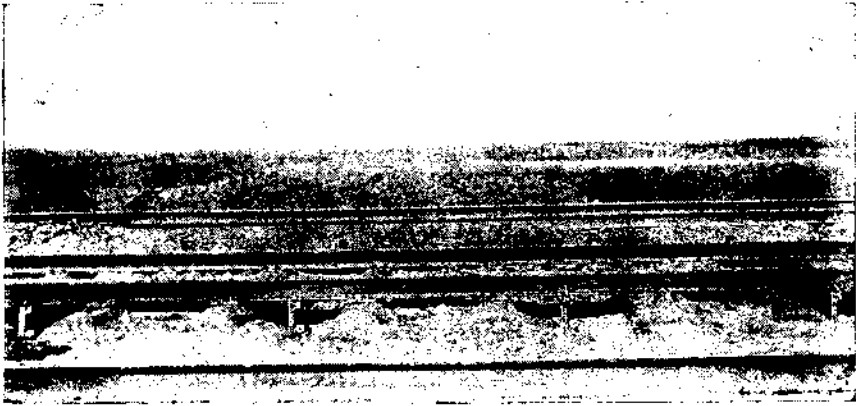
Таблица № 2.

Нагрузки на колеса и расстояния между осями паровоза серии СУ № 96—67.

№№ грузов.	Теоретические нагрузки на		Действительные нагрузки на колеса		Расстояние между осями паровоза	Отношение расстояний между осями паровоза к среднему расстоянию между осями шпал	Примечание
	ось кг	колесо кг	правого рельса мм	левого рельса мм			
	П а р о в о з.						
0 <sub>1</sub>	13 600	6 800	7 100	6 700	3 000	4.167	
I	18 300	9 150	9 000	9 000	1 975	2.743	
II	18 300	9 150	9 700	8 600	1 925	2.674	
III	18 300	9 150	9 000	8 300	3 400	4.722	
0 <sub>2</sub>	18 300	9 150	9 950	9 450			
Сумма.	86 800	43 400	43 400	42 050			
	Т е н д е р.						
1	14 000	7 000	7 100	7 350	2 880	4.000	
2	14 000	7 000	7 640	7 050	1 850	2.569	
3	14 000	7 000	6 450	7 250	1 800	2.500	
4	14 000	7 000	6 900	7 900	1 850	2.569	
Сумма.	56 000	28 000	28 090	29 550			

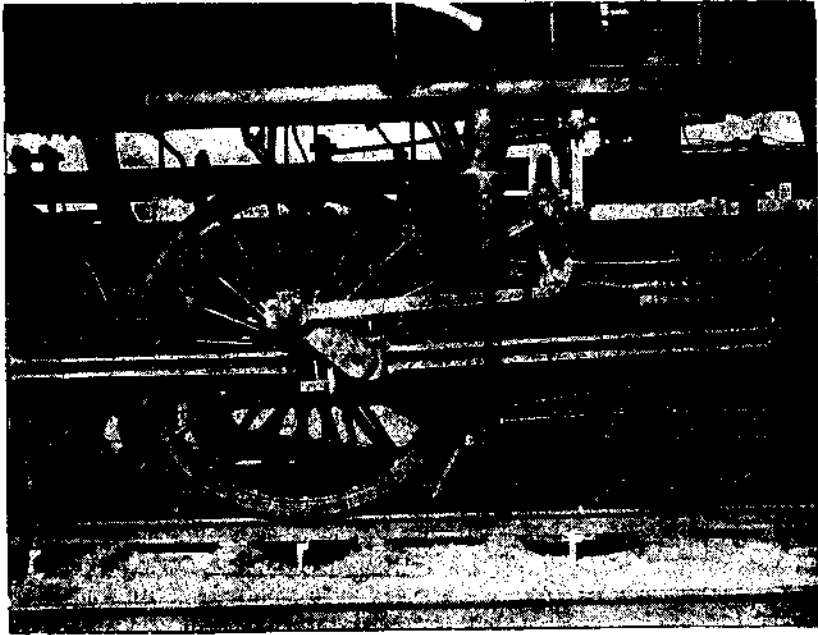
При производстве опытов паровоз постепенно медленно надвигался со стороны на испытываемое рельсовое звено до момента реагирования крайнего прибора. С этого момента при дальнейшей навигке паровоз устанавливался в каждом интересном для работы рассматриваемого участка рельсового звена положении, а именно: в районе приборов каждой осью над каждой шпалой, а также и посредине каждого шпального пролета; при начальной же стадии навигки он устанавливался первой осью (0<sub>1</sub>) лишь над каждой шпалой. При всех установках его производились отсчеты по всем приборам. Накатка паровоза повторялась для контроля показаний приборов

несколько раз, а всего было произведено четыре полных заезда и один частичный. Для определения напряжений в рельсах были установлены на них 8 приборов — тензометров Берри — Strain Gage H. C. Berry: четыре из них (№ 1, 2, 3 и 4) на правой рельсовой нитке, а четыре других (№ 5, 6, 7 и 8) в тех же шпальных пролетах левой нитки. Расположение всех приборов вдоль рельсового звена схематически изображено на фиг. № 2.



Фиг. 4.

Приборы в перевернутом виде прикреплялись при помощи струбцинок посредине шпальных пролетов к подошве рельса так, что их два опорные острия были плотно прижаты к нижней поверхности этой подошвы у самого наружного края ее. Общее распо-



Фиг. 5.

ложение приборов хорошо усматривается на фиг. № 4, а также и на фиг. № 5, изображающей производство самих наблюдений под паровозом серии СУ, а именно момент положения ведущей (II) оси его в точности над вторым и шестым приборами.

Такой установкой приборов достигается возможность определения напряжений в наиболее удаленной от нейтральной оси нижней фибре рельса, расположенной вдоль края подошвы его.

Тензометры Берри — приборы рычажные, измеряющие продольные деформации испытуемого элемента при базе прибора в 2" (5,08 см). Деформация взятой под наблюдение фибры элемента передается с увеличением в 200 раз через одну рычажную передачу, зубчатую рейку и шестеренку на шкалу измерительной коробики, вдоль которой движется на центральной оси стрелка. Цена малого деления шкалы прибора, выраженная в единицах напряжения, может быть принята в  $215 \text{ кг/см}^2$ . К достоинствам прибора можно отнести его чрезвычайно простую установку на испытуемый рельс, удобное для отсчетов расположение шкалы прибора и хорошую возвращаемость на нуль, являющиеся следствием чрезвычайно точной пригонки всех составных элементов механизма этого прибора. Как на недостатки его можно указать на довольно большую цену деления его шкалы и применимость прибора, вследствие отсутствия записывающего приспособления, только для статических наблюдений.

### § 3. Результаты опытов.

При постановке опытов по определению статических напряжений в рельсах Путьевым Испытательным Бюро ставились к разрешению нижеследующие основные задачи:

1) Определение величины максимальных статических напряжений в рельсах типа III-а, возникающих в них под действием паровозов серии С<sup>У</sup> и III<sup>II</sup>, \*) в условиях данной конструкции верхнего строения пути.

2) Изучение распределения напряжений вдоль рельса под данным паровозом и тендером, в связи с чем выясняется и степень равномерности статического воздействия на рельс всех осей паровоза, а, следовательно, и рациональность в этом отношении конструкции его.

3) Сопоставление получаемых двумя способами, опытным путем и теоретическим подсчетом по принятому методу инфлюэнтных линий изгибающих моментов, статических напряжений, возникающих в рельсе типа III-а под действием паровоза серии С<sup>У</sup> и III<sup>II</sup>. Такое сопоставление может прежде всего дать указание на степень действительной вероятности получаемых теоретическим подсчетом напряжений в рельсах, а, следовательно, может служить и проверкой этих методов расчета.

4) Сопоставление статических напряжений, возникающих в рельсах с соответствующими динамическими в тех же рельсах под той же подвижной нагрузкой. Эта задача будет выполнена по обработке всего собранного Путьевым Бюро материала по динамическим испытаниям.

Сопоставляясь с этими поставленными задачами Путьевого Бюро и был обработан весь цифровой опытный материал. Он представлен в виде ряда помещенных в работе сводных таблиц (№ III, IV и V), а также и в виде диаграмм (№ 6, 7, 8, 9 и 10) напряжений, возникающих в подошве рельса в данных сечениях его при пропуске паровоза с тендером через испытуемое звено. При этом эти диаграммы ориентированы по первой бегунковой оси его. Паровоз изображен на них в обратном виде и, следовательно, ординаты диаграмм, приходящиеся под осями паровоза, и дают величину напряжений в изучаемом сечении рельса, когда над ним устанавливается отмеченная ось паровоза.

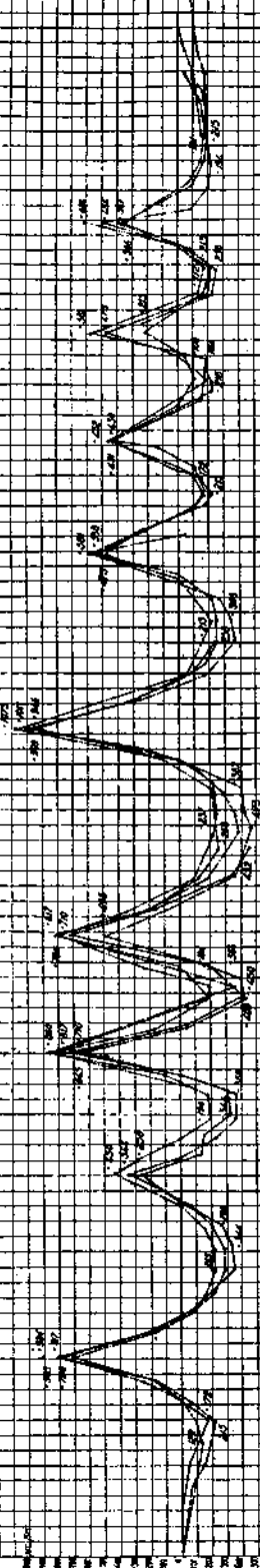
На фиг. № 6, 7, 8 и 9 изображены совмещенные диаграммы напряжений в подошве рельса в сечениях его, соответствующих приборам № 1, 2, 3 и 4 правого рельса (верхние диаграммы чертежей) и соответственно приборам № 5, 6, 7, 8 левого рельса (нижние диаграммы тех же чертежей) для четырех полных и одного частичного заездов одного и того же паровоза серии С<sup>У</sup> № 96—67.

\*) Опытные материалы по работе рельсов типа III-а под паровозом серии III в настоящее время прорабатываются Путьевым Бюро.

Амплитуды статических напряжений в рельсах типа М-а под параболом серии С-4

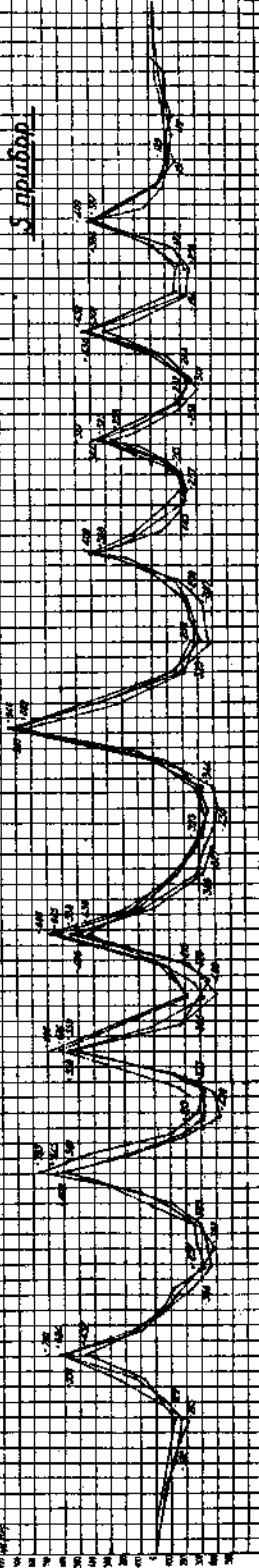
правый рельс

1 прибор



левый рельс

5 прибор

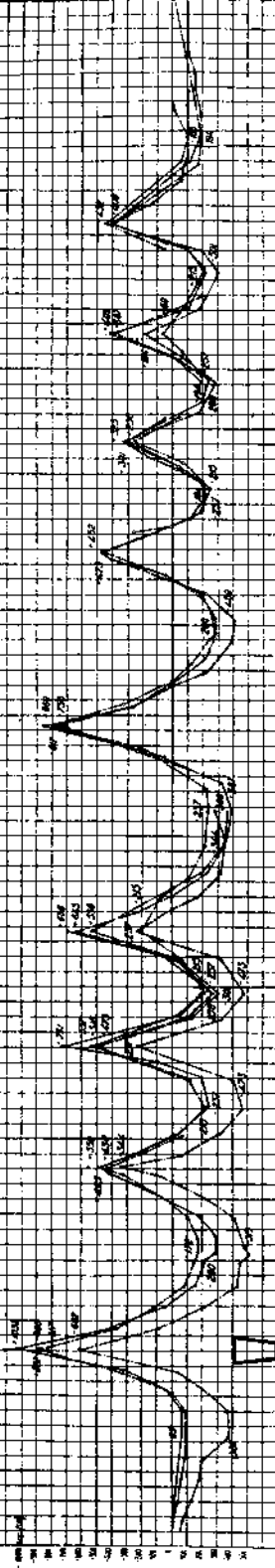


Фиг. 6.

Диаграммы статических напряжений в ребрах типа III-а под параболом кривизны СУ.

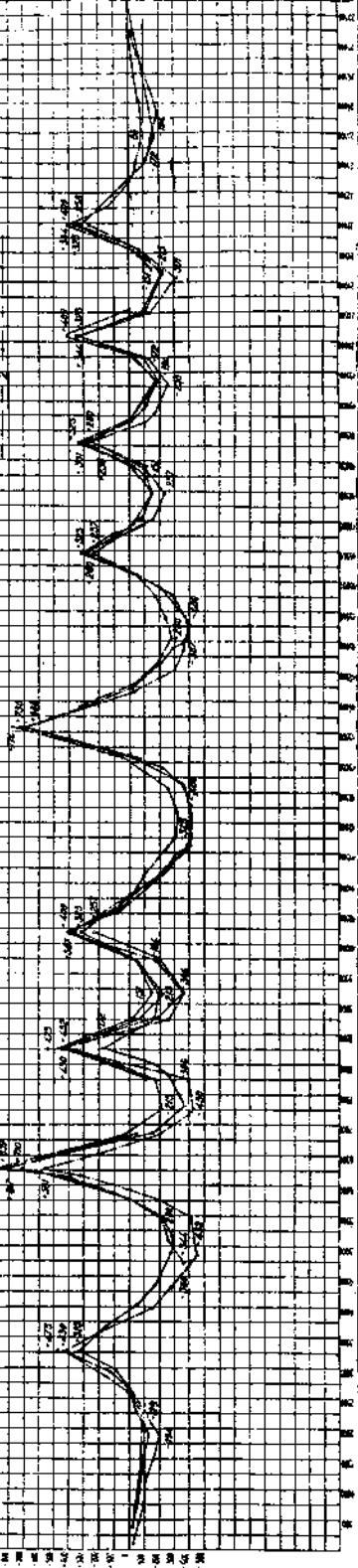
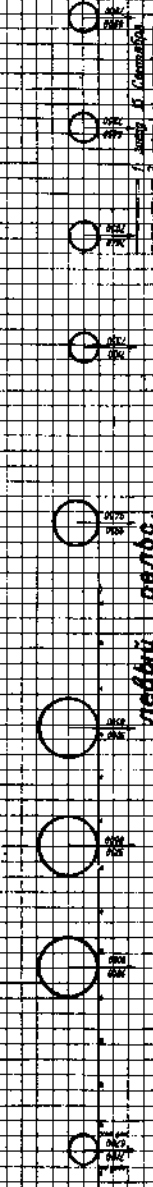
правый ребор.

2 ребор.



левый ребор.

6 ребор.

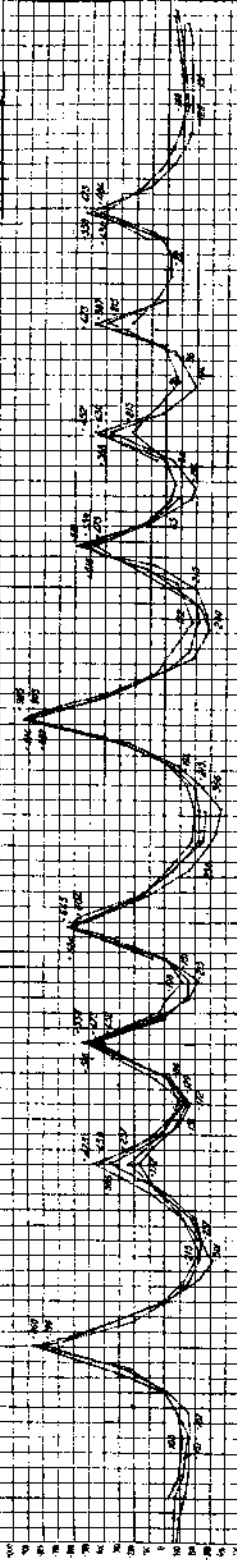


Фиг. 7.

Диаграммы статических напряжений в рельсах типа III-a под парбозом серии Су

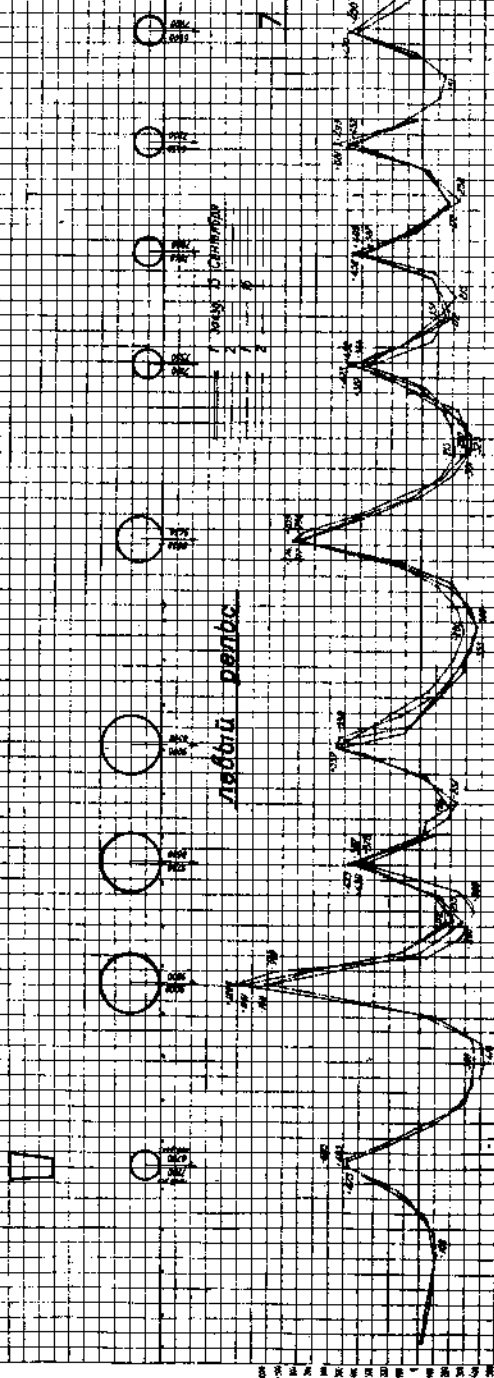
правый рельс

3 прибор



левый рельс

7 прибор

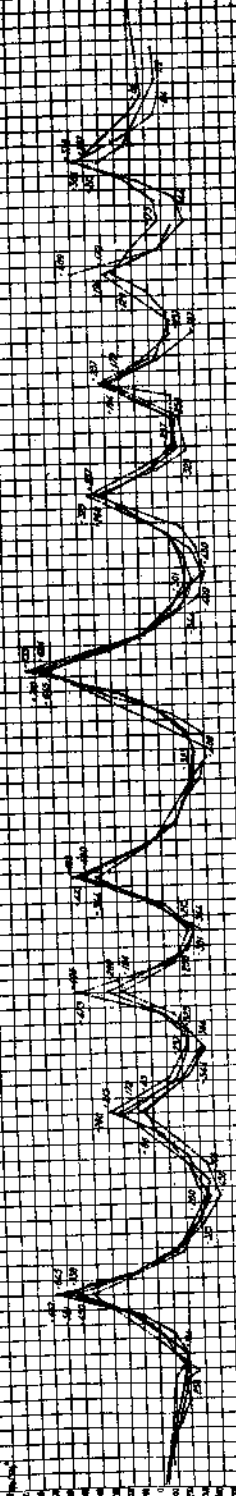


Фиг. 8,

Динамические статические напряжения в рельсах типа М-1 под паровозом серии СЧ

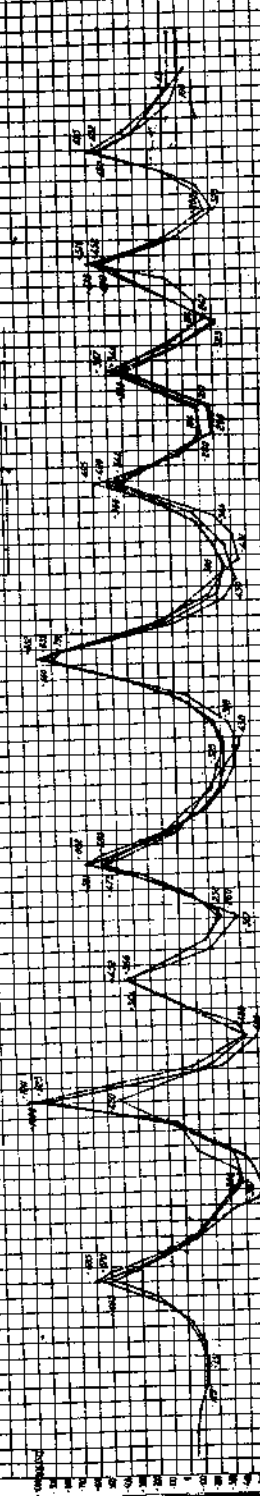
4-пробег

правый рельс



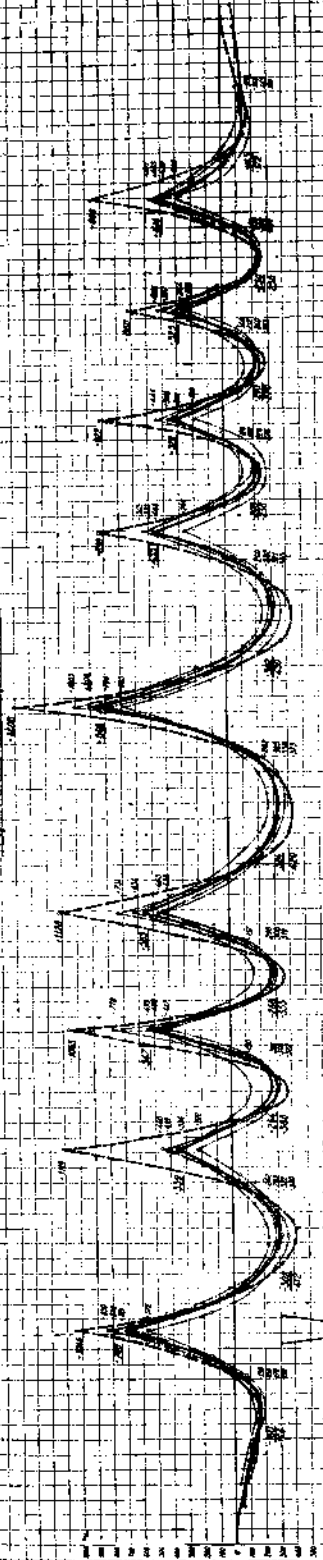
8-пробег

левый рельс

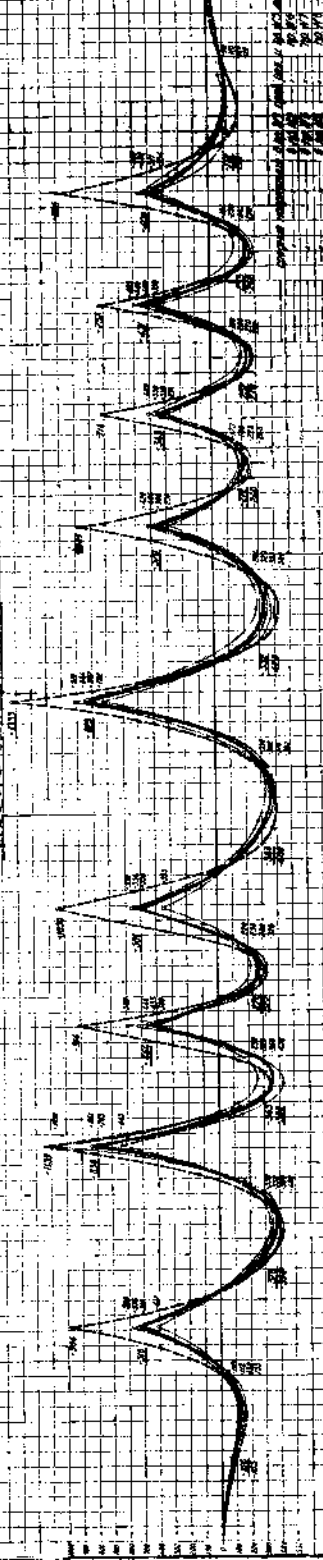


Дивергенція теоретическої і опитної середніх значеній статистическої напружености в рельсах типа III-a  
под параболом серици C<sub>2</sub>

правий рельс



лівий рельс



Средні значенія статистическої напружености в рельсах типу III-a под параболом серици C<sub>2</sub>

Фиг. 10.



На фиг. № 10 вычерчены совмещенные для различных приборов данного рельса диаграммы средних значений напряжений из всех заездов данного паровоза. При этом, для возможности их сопоставления, диаграммы сдвинуты одна по отношению другой на расстояние каждого последующего прибора от первого из них или, другими словами, мы как бы все приборы сдвигаем до совмещения с первым из них. На этих же диаграммах нанесены и кривые средних напряжений из всех заездов и всех приборов. Эти последние диаграммы характеризуют среднюю работу всего рельсового звена в целом, дают представление о величине средних напряжений, возникающих в подошве рельса при пропуске по нему всего паровоза с тендером. Здесь же вычерчены совмещенно и диаграммы напряжений в подошве рельса, полученные из теоретических подсчетов их для данной конструкции верхнего строения пути и подвижной нагрузки. При этом эти диаграммы построены отдельно для правого рельса и отдельно для левого, соотносясь с разною величиною нагрузок на колеса одной и той же оси паровоза серии СУ № 96—67, полученными при взвешивании этого паровоза. Эти нагрузки приведены были выше в таблице № II. Для построения теоретических диаграмм напряжений в рельсах паровоз пеликом переводился через рассматриваемое сечение рельса и для каждого характерного положения его по отношению этого сечения подсчитывались по инфлюэнтным линиям изгибающих моментов, таблицы которых приведены в настоящем выпуске НТК. в статье инж. В. В. Григорьева, напряжения в подошве рельса. При этом при определении ординат и инфлюэнтных линий исходили из значения коэффициента жесткости пути  $\gamma = 2,68$ , полученного из формулы:

$$\gamma = \frac{6 \times E \times J}{\alpha \times a \times \frac{b}{2} \times C \times l^2}, \dots \dots \dots (I)$$

где:  $E = 2150000 \text{ кг/см}^2$  — принятый модуль упругости рельсовой стали,

$J = 967,98 \text{ см}^4$  — момент инерции нового рельса типа III-а,

$\alpha = 0,90$  — коэффициент, учитывающий продольный изгиб шпалы,

$a = 25,5 \text{ см}$  — ширина нижней постели шпалы,

$b = 272 \text{ см}$  — длина шпалы,

$C = 4 \text{ кг/см}^2$  — коэффициент постели шпалы для балласта среднего качества; значение его принято согласно Приказа НКПС от 24 ноября 1925 г. Бр. 349, Оф. Отд. ВПС № 851,

$l = 72 \text{ см}$  — среднее расстояние между осями шпал.

Переходя теперь к детальному описанию результатов опытов, остановимся прежде всего на величине опытных статических напряжений, возникающих в рельсе типа III-а под паровозом серии СУ.

Как показывают диаграммы (№ 6, 7, 8 и 9) напряжений в рельсе по всем заездам паровоза, эти напряжения, в одном и том же сечении рельса и при одном и том же положении паровоза при различных заездах его, очень редко получаются равными. Этого и нужно было ожидать, так как в обстановке опыта трудно рассчитывать на получение при различных заездах совершенно идентичных условий для работы рельса. Не абсолютно точная установка паровоза, сопровождаемая торможением его, колебание во время опыта горизонта воды в котле и тендере, изменение количества топлива, внутреннее трение рессор, не абсолютная точность показаний прибора и многое др. — все это может оказывать то или иное влияние на работу рельсов, при чем влияние каждого из этих факторов на путь в отдельности в большинстве случаев совершенно не поддается учету. Что же касается величины этих отклонений, то, как показывает просмотр диаграмм, они сравнительно незначительны за исключением нескольких случаев.

На основании изложенного, для суждения о статической напряженности рельсов под паровозом серии СУ, всего рациональнее исходить не из максимальных значений единичных напряжений, возникающих от каждого отдельного заезда паровоза, а из средних максимальных напряжений из всех его заездов для каждого прибора. Очевидно, что эти напряжения будут наиболее характерными для данного типа верхнего строения пути, а потому в дальнейшем и будем ими пользоваться в наших заключениях.

Максимальные статические положительные и отрицательные напряжения, средние из всех заездов паровоза, для каждого прибора, а следовательно, и для каждого взятого под наблюдение сечения данных рельсов, внесены в таблицу № III (см. столбцы 2—5 и 8—11). Как видно из этой таблицы, максимальное положительное напряжение в правом рельсе получилось по прибору № 1, когда над ним находилась задняя поддерживающая ось паровоза; оно равно  $+1005 \text{ кг/см}^2$ . Максимально-отрицательное напряжение в том же рельсе — при положении прибора между задней спаренной осью (III) паровоза и поддерживающей (0) его осью доходило до  $-375 \text{ кг/см}^2$ . В левом рельсе соответственно имеем максимальное положительное напряжение под первой (I) спаренной осью паровоза в  $+1091 \text{ кг/см}^2$ , а отрицательное между (I) и (II) осями в  $-430 \text{ кг/см}^2$ .

Так как крайняя верхняя фибра рельса удалена от нейтральной оси далее, чем нижняя его фибра, то, естественно, в головке рельса можно ожидать и больших напряжений по сравнению с напряжениями, возникающими в подошве их.

Определим теперь эти возможные в головке рельса максимальные напряжения  $n_2$ , соответствующие тому же положению нагрузки; при этом будем пользоваться формулой:

$$n_2 = n_1 \times \frac{l_2}{l_1} \dots \dots \dots \text{(II)}$$

В этом выражении обозначают:

- $n_1$  — соответствующее опытное максимальное напряжение в подошве рельса,
- $l_1$  — расстояние подошвы рельса от нейтральной оси,
- $l_2$  — расстояние крайней верхней фибры головки рельса от той же оси.

После подстановки соответствующих величин, получим:

- 1) — для головки правого рельса  $n_2' = -1067$  и  $+398 \text{ кг/см}^2$
- 2) » » » »  $n_2'' = -1158$  и  $+456 \text{ кг/см}^2$

Наблюдения производились над новыми рельсами. В изношенных рельсах — напряжения, очевидно, будут большие. Если предположить, например, наличие вертикального осевого износа головки в 6 мм, то для этого случая будем иметь следующие напряжения:

- 1) — для головки правого рельса  $n_2' = -1191$  и  $+444 \text{ кг/см}^2$
- 2) » » левого »  $n_2'' = -1293$  и  $+509 \text{ кг/см}^2$

Итак, следовательно, опытные данные Путевого Бюро для подошвы рельса типа Ш-а дают максимальные статические напряжения под паровозом серии СУ:

$$+1091 \text{ кг/см}^2 \text{ и } -430 \text{ кг/см}^2.$$

Необходимо отметить, что действительные напряжения рельса могут быть несколько и выше полученных нами опытных. Дело все в том, что прибор может учитывать изменения напряжений в рельсе, происшедшие в нем лишь с момента установки прибора и, следовательно, он главным образом учитывает основные напряжения, возникающие в рельсе от действия подвижного состава, а также и изменение температурных напряжений, происшедшее в рельсе с того же момента установки прибора. До этого же момента в рельсе могли уже быть некоторые напряжения как температурные, так и некоторые побочные, как то: начальные — от быстрого и неравномерного охлаждения при изготовлении рельсов и последующие — от холодной прокатки их колесами подвижного состава. При этом эти дополнительные не учитываемые прибором напряжения, будучи прикладываемыми к основным опытным напряжениям, могут их как увеличивать, так и уменьшать в зависимости от знака их. Действительное значение максимального суммарного напряжения рельса, являющегося следствием всех указанных выше причин, в настоящее время еще не может быть установлено, ввиду недостаточной изученности влияния побочных из них на напряженность рельса.

Интересно отметить, что напряжения в рельсе при проходе подвижного состава имеют знако-переменный характер; каждая проходящая ось дает одну перемену знака. При этом основные напряжения (растягивающие в подошве рельса и сжимающие в

Т а б л и

средних максимальных напряжений, возникающих в подошве рельса

Наименование оси карового.	П р а в ы й  р е л ь с .				Средние напря- жения в подошве рельса, получен- ные из показаний всех приборов.	Максимальные расчетные напря- жения в головке рельса.
	Прибор № 1.	Прибор № 2.	Прибор № 3.	Прибор № 4.		
I	— 156	—195	—150	—172	—160	—170
0 <sub>1</sub>	+ 830	+839	+821	+572	+766	+813
	— 282	—322	—242	—370	—302	—321
I	+ 419	+460	+336	+222	+359	+381
	— 322	—305	—130	—301	—264	—280
II	+ 778	+499	+495	+417	+547	+581
	— 308	—290	—157	—310	—268	—284
III	+ 731	+465	+634	+436	+567	+602
	— 338	—325	—262	—375	—324	—344
0 <sub>2</sub>	+1005	+796	+906	+683	+848	+900
	— 282	—321	—240	—365	—302	—321
1	+ 543	+468	+532	+269	+453	+481
	— 190	—226	—120	—276	—203	—215
2	+ 446	+301	+366	+199	+328	+348
	— 212	—240	—140	—243	—210	—223
3	+ 423	+264	+387	+226	+325	+345
	— 230	—242	—	—260	—250	—265
4	+ 465	+420	+471	+299	+414	+439
	— 190	—145	—128	—142	—145	—154
Максимальные значения . . . . .	+1005	+839	+906	+683	+848	+900
	— 338	—325	—262	—375	—324	—344

годовке) приблизительно раза в два---три больше напряжений противоположных знаков. Эта знако-переменность напряжений создает благоприятную обстановку для проявления явлений усталости в рельсовой стали.

**ц в III**

**типа III-а под паровозом серии СУ, по показаниям каждого прибора.**

Левый рельс.				Среднее напря- жения в положе- нии рельса, получе- ные из показаний всех приборов.	Максимальные расчетные напря- жения в головке рельса.	Примечание.
Прибор № 5.	Прибор № 6.	Прибор № 7.	Прибор № 8.			
8	9	10	11	12	13	14
—153	—132	— 112	—110	—125	—133	
+590	+417	+ 511	+556	+516	+548	
—338	—352	— 390	—420	—378	—401	
+645	+765	+1091	+841	+836	+887	
—365	—355	— 258	—430	—355	—377	
+589	+446	+ 433	+388	+464	+493	
—302	—258	— 220	—328	—276	—293	
+559	+352	+ 554	+538	+501	+532	
—376	—390	— 330	—362	—363	—385	
+919	+722	+ 807	+844	+823	+874	
—320	—352	— 284	—380	—322	—342	
+366	+291	+ 420	+404	+370	+393	
—228	—180	— 170	—268	—212	—225	
+328	+291	+ 409	+350	+345	+366	
—270	—200	— 290	—282	—237	—252	
+409	+350	+ 495	+468	+431	+458	
—230	—245	— 164	—290	—233	—247	
+387	+334	+ 462	+452	+409	+434	
—122	—120	— 110	— 98	—112	—119	
+919	+765	+1091	+844	+836	+887	
—388	—390	— 390	—430	—378	—401	

При сопоставлении диаграммы средних напряжений (см. фиг. № 10), возникающих в рельсе под каждым прибором, закономерных отклонений в показаниях приборов одного и того же рельса в зависимости от положения их вдоль рельса не наблюдается, а потому мы вправе сделать вывод, что рельсы на всем том протяжении их, где установлены эти приборы, работают приблизительно одинаково.

Обращает на себя внимание резкая разница в величинах напряжений под первой (1) спаренной осью паровоза при сопоставлении показаний приборов левого рельса с показаниями соответствующих приборов правого рельса.

Действительно для правого рельса по показаниям всех его приборов имеем следующие напряжения:

$$+ 419; + 460; + 336 \text{ и } + 222 \text{ кг/см}^2,$$

а для левого рельса по его приборам имеем, соответственно, значительно большие напряжения:

$$+ 645; + 765; + 1091 \text{ и } + 841 \text{ кг/см}^2$$

В чем же может быть причина такой большой разницы в напряжениях, полученных в рельсе под колесами одной и той же оси паровоза?

Отнести эту разницу за счет неодинаковой нагрузки на колеса этой оси нет никаких оснований. При взвешивании паровоза нагрузки на эти колеса получились равными. Если же в пути и произошло вполне возможное некоторое перераспределение нагрузок, так во всяком случае оно не могло быть настолько значительным, чтобы вызвать такую большую неравномерность в напряжениях рельсов.

Так же нет оснований отнести эту разницу и за счет каких-нибудь неправильностей в самом пути, например, за счет неравномерной по длине шпал подбивки их, ибо эта разница получается по показаниям не одного какого-нибудь прибора, а всех без исключения. Предполагать же наличие неравномерной подбивки всех шпал на всем звене совершенно невероятно, так как при движении поездов такая неравномерность была бы, конечно, обнаружена. Этот путь ежедневно при окончании наблюдений открывался для пропуска всех поездов и не требовал никаких исправлений, за чем ежедневно наблюдал путевой староста.

Итак остается отнести это явление за счет какого то неизвестного дефекта в самой оси паровоза, например, некоторого перекаса этой оси по отношению пути. При наличии этого последнего, при подвижках паровоза колесо этой оси могло упираться своею ребордою в головку левого рельса. При этом появляющаяся дополнительная горизонтальная сила, приложенная к головке рельса, стремится выгнуть его в наружу. Кроме того, и обычно наблюдаемый при этом накатывании некоторый подъем по отношению рельса этого колеса мог вызвать, вследствие сжатия рессоры, так же и некоторую дополнительную вертикальную силу. Вот эти то две дополнительные силы и могли частично создать некоторое перенапряжение левого рельса. Во всяком случае, такое объяснение является лишь предположительным, так как точного промера с целью определения положения всех осей паровоза по отношению его рамы во время опытов произведено не было.

На фиг. № 10, как и указано было выше, нанесена и средняя диаграмма напряжений из показаний всех приборов. Эта кривая характеризует работу рельсового звена в целом. В таблице № III (столбцы 6 и 12) приведены максимальные положительные и отрицательные напряжения этих средних кривых. Максимальные напряжения по этим диаграммам получаются для правого рельса в  $+ 848 \text{ кг/см}^2$  и  $324 \text{ кг/см}^2$ , а для левого соответственно в  $+ 836 \text{ кг/см}^2$  и  $378 \text{ кг/см}^2$ . В столбцах 7 и 13 той же таблицы подсчитаны по формуле II, на основании напряжений в подошве рельса, соответствующие напряжения и в крайней верхней фибре головки его.

При рассмотрении в целом этих средних диаграмм напряжений в подошве рельса под паровозом серии С<sup>У</sup> с тендером — обращает на себя внимание перегруженность задней поддерживающей (0<sub>2</sub>) оси паровоза, вследствие чего под этой осью получают большие статические напряжения в рельсах. Действительно, если мы сравним напряжения, возникающие под этой осью (0<sub>2</sub>) паровоза, с соответствующими напряжениями, возникающими под ведущей средней (II) осью того же паровоза, то убедимся, что разница в напряжениях получается очень значительной. Так, в подошве правого рельса имеем среднее максимальное положительное напряжение под осью (0) в  $+ 848 \text{ кг/см}^2$ , а под осью (II) только в  $+ 547 \text{ кг/см}^2$ . Соответственно для левого рельса имеем: под осью (0<sub>2</sub>)  $+ 823 \text{ кг/см}^2$ , а под осью (II)  $+ 464 \text{ кг/см}^2$ . Эта разница в напряжениях

в данном случае не проходит за счет соответственно больших разниц в нагрузках, приходящихся на эти колеса, ибо они очень незначительны. Действительно, для оси (II) имеем нагрузки на правое колесо в 9750 кг, а на левое—в 8600 кг, а для колес оси (0<sub>2</sub>) имеем соответственно—9950 кг и 9450 кг.

Объяснение этому явлению нужно искать главным образом в разгружающем влиянии на величину изгибающих моментов, возникающих в рассматриваемом сечении рельса под действием данной оси, соседних с ней, близко расположенных осей того же паровоза.

Действительно, сравнивая для нашего случая расстояния задней поддерживающей (0<sub>2</sub>) оси паровоза до ее соседних осей с соответствующими расстояниями до своих соседних—ведущей (II) оси паровоза, мы убеждаемся в большом их различии. Так, для оси (0<sub>2</sub>) имеем расстояние ее до оси (III) в 3400 мм, а до первой (I) тендерной—в 2880 мм. Для оси (II) соответственные расстояния получаются: до оси (I) в 1975 мм, а до (III)—в 1925 мм.

Из всего сказанного следует, насколько важно, при назначении нагрузок на оси паровоза при конструировании его, считаться и с относительным расположением этих осей под ним. Как правило, при обычно принятых значениях коэффициента жесткости пути  $\gamma$  и расстояний между осями паровозов, для уменьшения величины напряжений, возникающих в рельсах, можно принять следующее положение: чем ближе расположены оси паровоза, тем меньше величина напряжений. Но при стремлении следовать этому правилу, необходимо так же иметь ввиду, что кроме рельсов в верхнем строении пути имеются и другие составляющие элементы, как то: шпалы, балласт и т. д. И для этих элементов пути для получения наименьших напряжений в них это правило может быть и не применимо. Так, для шпал и балласта закон изменения величины напряжений в зависимости от величины расстояний между осями паровоза будет как раз обратный тому, какой мы указали для рельсов. А потому, при назначении расстояний между осями паровоза, необходимо считаться с наимыгоднейшими значениями их, исходя из работы всех без исключения составляющих элементов пути. В задачу настоящей работы не входит определение наимыгоднейших значений этих расстояний, сообразуясь с работой всех элементов пути. Для решения ее Путевое Бюро еще не располагает всем необходимым опытным материалом. В настоящее же время мы можем лишь пользоваться материалом, касающимся работы только рельсов. И в отношении статической работы этого элемента пути можно сказать, что конструкция паровоза серии СУ обладает некоторым недостатком вследствие большой нагруженности задней поддерживающей (0<sub>2</sub>) оси его.

Такое заключение о перегруженности задней поддерживающей (0<sub>2</sub>) оси паровоза этой серии мы делаем лишь на основании статических диаграмм напряжений. В паровозе, находящемся в движении, конечно, произойдет некоторое перераспределение нагрузок, передающихся на отдельные оси его. В общем виде вертикальное давление колеса паровоза, находящегося в движении, может быть выражено по формуле проф. Ломоносова так:

$$Z = P + Z_1 + Z_0 + Z_n^*), \dots \dots \dots (III)$$

В этом выражении обозначают:

P —вертикальную силу, передающуюся колесу от статической нагрузки паровоза,

Z<sub>1</sub> —вертикальную силу от качки надрессорной части паровоза,

Z<sub>0</sub> —вертикальную составляющую центробежной силы избыточного противовеса,

Z<sub>n</sub> —вертикальную составляющую, являющуюся результатом конечной длины шагуна.

Эта формула полностью применима для ведущего колеса. Для спаренных колес в этой формуле последний член Z<sub>n</sub> равен нулю. И, наконец, для поддерживающих осей паровоза и для всех осей тендера в этой формуле два последних ее члена Z<sub>0</sub> и Z<sub>n</sub> равны нулю.

\*) Журнал Инженерного Совета № 179, 1914 г.

Следовательно, оси паровоза, ведущая и спаренные, по сравнению с другими его осями во время движения паровоза могут оказывать на путь несколько большее воздействие при сопоставлении такого сравнения со статическим воздействием на путь тех же осей его.

Во всяком случае, даже только на основании цифрового материала статических испытаний с паровозом серии  $C^V$ , можно теперь уже определенно сказать, что и динамическое воздействие задней поддерживающей ( $O_2$ ) оси этого паровоза будет, вероятно, так же значительным.

Из всего изложенного становится совершенно ясным, насколько важно для железнодорожного хозяйства в целом при конструировании нового паровоза считаться также и с его возможным будущим воздействием на верхнее строение пути. Пренебрежение этими соображениями может повлечь за собою недостаточное использование тяговых возможностей такого паровоза на линиях с облегченным верхним строением пути.

Переходим теперь к последней задаче нашей работы, а именно: к сопоставлению средних из всех заездов и всех приборов опытных напряжений, возникающих в рельсе, с напряжениями, полученными для того же верхнего строения пути и паровоза расчетным путем по методу инфлюэнтных линий изгибающих моментов.

Такое сопоставление этих напряжений выполнено для максимальных положительных и отрицательных напряжений в таблице № IV, а графически—на фиг. № 10, где кривые средних напряжений представлены сплошной жирной линией, а кривые теоретических напряжений—такой же пунктирной линией. При рассмотрении указанных диаграмм сильно бросается в глаза большое превышение максимальных положительных теоретических напряжений рельса над его действительными, полученными при том же положении паровоза. В таблице № IV в столбцах 4 и 8 выписаны разницы этих напряжений, а в столбцах 5 и 9 эти разницы выражены в процентах по отношению к действительным напряжениям. Этот процент для правого рельса колеблется в пределах от 36,5 до 211,7%, при чем последний отсчет относится к первой (I) спаренной оси паровоза, под которой напряжения вообще, как и отмечено было выше, получались сильно отличными от ряда других напряжений. А потому правильнее брать не это предельное значение процента, а другое, меньшее, равное 150,6%, полученное для второй тендерной оси. В среднем этот процент для максимальных положительных напряжений, возникающих под паровозом серии  $C^V$  в правом рельсе, получается равным 109,2%. Для левого рельса имеем соответственные колебания величины этого процента для положительных напряжений от 36,2% до 143,3% или, в среднем, до 86,0%.

Для обоих рельсов этот средний процент отклонения положительных максимальных теоретических напряжений от соответствующих им опытных напряжений может быть принят равным 97,6%.

Итак, следовательно, теоретические максимальные положительные напряжения под паровозом серии  $C^V$ , при принятом при расчете коэффициенте постели шпал  $C=4$  кг/см<sup>3</sup>, получаются в среднем вдвое (округленно) больше соответствующих действительных напряжений, полученных в тех же рельсах опытным путем.

Несколько иная картина получается с максимально-отрицательными напряжениями. Здесь в большинстве случаев теоретические напряжения получаются так же больше опытных, но процент отклонения их значительно меньше. Так, для правого рельса имеем колебание этих процентов в пределах от 2,5% до 42,3% или, в среднем, 24,6%, а для левого рельса, соответственно, от + 3,4% до 72,3% или, в среднем, до 20,0%.

Для обоих рельсов этот процент отклонения может быть принят в среднем в 22,3%.

Отсюда следует, что отклонение теоретических максимальных отрицательных напряжений от соответствующих опытных раза в четыре менее, чем аналогичные отклонения, наблюдаемые в положительных напряжениях.

При суждении о достаточной прочности рельса данного типа, обычно, при теоретических подсчетах исходят из абсолютно-максимальных значений напряжений, возникающих в рельсе при самом невыгоднейшем в этом отношении положении паровоза. Как показывают наши диаграммы для этих значений напряжений, отклонения

расчетных теоретических напряжений от соответствующих опытных получаются наибольшими, при чем в сторону значительного преувеличения этих напряжений. Отсюда становится совершенно ясным, насколько важно установить причины такого отклонения их.

Остановимся теперь несколько на выяснении этого вопроса, хотя заранее необходимо оговориться, что для окончательного суждения по такому важному вопросу проделанных Путевым Бюро опытов еще недостаточно.

Так как такие отклонения наблюдаются под всеми осями паровоза, а не носят случайный характер, то отнести их за счет недостаточной точности производства самих наблюдений нет никаких оснований. Остается предположить, что при принятом нами расчете рельсов по методу инфлюэнтных линий изгибающих моментов, не учитываются какие то путевые факторы, уменьшающие величины максимальных напряжений.

Здесь прежде всего может возникнуть вопрос о правильности принятого при подсчетах значения коэффициента постели шпал  $C$  в  $4 \text{ кг/см}^2$ , величина которого была установлена, сообразуясь с указаниями Приказа НКПС от 24 ноября 1925 г. Бр. 349 Оф. Отд. «ВПС» № 851.

Для выяснения его были определены значения максимальных напряжений, возникающих в рельсе под задней поддерживающей осью ( $O_2$ ) паровоза, при других значениях коэффициента постели шпал  $C$ , а именно, при значениях его в 3 и  $5 \text{ кг/см}^2$ .

Полученные при этом напряжения в рельсах сгруппированы в таблице V.

Таблица № V

значений теоретических напряжений в подошве рельса типа III-а под задней поддерживающей осью ( $O_2$ ) паровоза серии СУ при различных значениях коэффициента постели шпалы  $C$ .

Наименование оси паровоза	Значение коэффициента постели шпалы $C$	Правый рельс.			Левый рельс.		
		Максимальн. теоретич. напряж. в подошве рельса $\text{кг/см}^2$	Изменение напряж. в		Максимальн. теоретич. напряж. в подошве рельса $\text{кг/см}^2$	Изменен. напряж. в	
			абсолют. числах $\text{кг/см}^2$	процентах по отношен. к напряж. при $C=4 \text{ кг/см}^2$		абсол. числах $\text{кг/см}^2$	проц. по отг. напряж. при $C=4 \text{ кг/см}^2$
$O_2$	3	+1462	54	3,8	+1385	50	3,7
	4	+1408	58	4,1	+1335	54	4,0
	5	+1350			+1281		

Из сопоставления этих напряжений усматривается, что с изменением значения коэффициента постели шпалы с  $4 \text{ кг/см}^2$  до  $5 \text{ кг/см}^2$ , а также и с  $4 \text{ кг/см}^2$  до  $3 \text{ кг/см}^2$ , напряжения меняются не более, чем на  $58 \text{ кг/см}^2$  или на 4,1%. Внесение таких изменений в величину максимальных напряжений конечно общей картины существенно не изменит. Остается сделать заключение, что истинные причины в наблюдаемых больших разницах максимальных напряжений, опытных и теоретических, заключаются в неправильно взятом значении коэффициента постели шпалы  $C$ , а в чем то другом.

Нам думается, что главная причина явления крестя в недостаточно обоснованном предположении, положенном в основу всей теории расчета пути, а именно: что коэффициент постели шпалы  $C$  есть для данного балласта величина постоянная, не-



Т а б л и

максимальных теоретических и максимальных средних из всех  
под паровозом

НАИМЕНОВАНИЕ ОСИ ПАРОВОЗА.	П р а в ы й р е л ь с.				Среднее максимальн. действит. напряжений.
	Среднее максимальн. действит. напряжение.	Максимальн. теоретич. напряжение.	Р а з н и ц а в		
			абсолют. числах.	в % по отн. действ. напр.	
1	2	3	4	5	6
	-160	- 164	4	2,5	-125
0 <sub>I</sub>	+766	+1046	280	36,5	+516
	-302	- 412	110	36,4	-378
I	+359	+1119	760	211,7	+836
	-264	- 368	104	39,4	-355
II	+547	+1065	518	94,7	+464
	-268	- 353	85	31,7	-276
III	+567	+1128	561	98,9	+501
	-324	- 420	96	29,6	-363
0 <sub>2</sub>	+848	+1408	560	66,0	+823
	-302	- 430	128	42,3	-322
1	+453	+ 838	385	85,0	+370
	-203	- 238	35	17,2	-212
2	+328	+ 822	494	150,6	+345
	-210	- 270	60	28,6	-237
3	+325	+ 630	305	93,8	+431
	-250	- 250	0	0	-233
4	+414	+ 868	454	109,7	+409
	-145	- 172	27	18,6	-112
<b>Максимальные напряжения.</b>	<b>+848</b>	<b>+1408</b>	<b>—</b>	<b>—</b>	<b>+836</b>
	<b>-324</b>	<b>- 430</b>	<b>—</b>	<b>—</b>	<b>-373</b>

зависящая от глубины оседания шпалы  $y$ . Реакция шпальных опор на рельс определяется при этом по формуле:

$$R = y \times D, \dots\dots\dots (IV)$$

где:  $y$  в см—оседание опоры,

ц а IV.

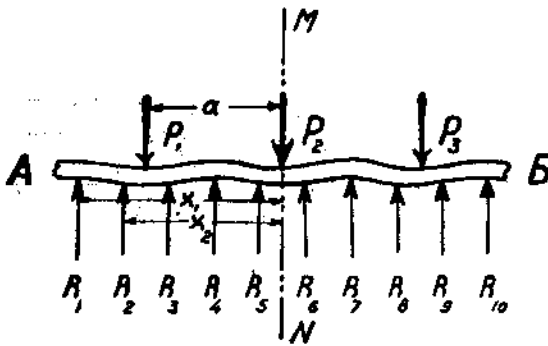
заездов действительных напряжений в подошве рельса типа Ш-а серии С<sup>У</sup>.

в ы й р е л ь с.			Средний % отклонения максимальных теоретических напряжений от действительных для всего паровоза с тендером по отношению к действительным напряжениям.
Максимальн. теоретич. напряжение.	Р а з н и ц а в		
	абсолют. числах.	в % по отв. действ. напр.	
7	8	9	10
— 155	30	24,0	Для правого рельса: 1) для максимально-отрицательных напряжений—24,6% 2) для максимально-положительных напряжений—109,2%.
+ 986	470	91,1	
— 393	20	5,3	
+1139	303	36,2	
— 343	—12	—3,4	Для левого рельса: 1) для максимально-отрицательных напряжений—20,0%. 2) для максимально-положительных напряжений—86,0%.
+ 914	450	96,8	
— 322	46	16,7	
+1050	549	109,6	
— 400	37	10,2	Для обоих рельсов в среднем: 1) для максимально-отрицательных напряжений—22,3%. 2) для максимально-положительных напряжений—97,6%.
+1335	512	62,2	
— 428	106	32,9	
+ 889	519	140,3	
— 240	28	13,2	
+ 716	371	107,5	
— 270	33	13,9	
+ 737	306	71,0	
— 268	35	15,0	
+ 995	586	143,3	
— 193	81	72,3	
+1335	—	—	
— 428	—	—	

$$D = \alpha \times \frac{a \times b}{2} - C \dots (V) \text{ сила, погружающая в балласт полупшалу на 1 см;}$$

в этой формуле буквенные обозначения имеют указанные выше для формулы (I) значения.

При  $C$  постоянном, реакции опоры рельса —  $R$  находятся в прямолинейной зависимости от величины  $D$ . В действительности, вероятнее всего, этого нет, и значения коэф-



Фиг. 11.

фициента  $C$  растут с ростом оседания шпалы  $y$ . Если допустить это предположение, то легко убедиться, что при условии сохранения тех же осадок шпал величина изгибающего момента, возникающего в рельсе под данным грузом, может получиться меньшей.

Рассмотрим для простоты рассуждения участок рельса А-В, нагруженный только тремя грузами  $P_1, P_2$  и  $P_3$  (см. фиг № 11). Этот рельс опирается на шпалы, действие которых на него заменим реактивными силами  $R_1, R_2, R_3$  и т. д.

Рассматривая этот рельс, как свободную систему, находящуюся под действием указанных выше сил, мы можем по законам статики написать для момента  $M$  всех левых сил, приложенных к рельсу, относительно сечения его  $MN$ , расположенного под грузом  $P_2$ , следующее выражение:

$$M = -P_1 \times a + R_1 \times x_1 + R_2 \times x_2 + R_3 \times x_3 + \dots \dots \dots (I)$$

где:  $a$  — расстояние груза  $P_1$  от груза  $P_2$ ,  $x_1, x_2, \dots$  расстояния реактивных сил  $R_1, R_2, \dots$  от того же груза  $P_2$ .

Это выражение можно переписать в упрощенном виде:

$$M = -P_1 \times a + \sum R x \dots \dots \dots (VI)$$

Делая подстановку в это уравнение вместо  $R$  его значения по формуле (IV), получаем:

$$M = -P_1 \times a + \sum y \times D \times x \dots \dots \dots (VII)$$

или 
$$M = -P_1 \times a + k \sum y \times C \times x \dots \dots \dots (VIII)$$

где: 
$$k = a \times \frac{a \times b}{2} \dots \dots \dots (V)$$

Первый член правой части уравнения (VIII) —  $(-P_1 \times a)$ , очевидно, остается постоянным, как бы не менялось значение коэффициента  $C$ . Точно также остается при этом постоянным и равнодействующий момент всех реактивных сил, приложенных к шпалам и уравнивающих силу  $P_1$  ввиду симметричности расположения этих сил  $R$  по отношению силы  $P_1$ . Что же касается реактивных сил, уравнивающих силу  $P_2$  и расположенных только слева от этого груза, то сумма моментов этих сил, при переменном значении коэффициента  $C$ , может уменьшиться.

Действительно, при этом условии величины реакций шпал, более удаленных от рассматриваемого сечения  $MN$  и расположенных между грузами  $P_1$  и  $P_2$ , уменьшаются ввиду меньших их осадок, а, следовательно, и меньших значений коэффициента постели шпал  $C$  (см. форм. IV) за счет увеличения нагрузок на ближайшие шпалы с большими осадками, а, следовательно, и при больших значений для них коэффициентов  $C$ . Вследствие этого при сохранении тех же самых расстояний ( $x$ ) этих сил от груза  $P_2$  суммарный момент их —  $k \times \sum y \times C \times x$  может уменьшиться.

В конечном итоге вследствие этой причины общий момент всех сил  $M$ , приложенных к левой половине рельса, по отношению сечения его  $MN$ , совпадающего с грузом  $P_2$ , может так же уменьшиться.

Во всяком случае это объяснение, хотя и возможное, можно принимать лишь как предположительное. До опытного изучения коэффициента  $C$ , выявления всех свойств его в зависимости от изменения величины нагрузок, передающихся на шпалы, и осадки

этих последних, а также и до большего накопления и опытного материала по определению статических напряжений в рельсах, и величин нагрузок, действительно передающихся на шпалы, говорить о нахождении действительной причины этих явлений в настоящее время несколько преждевременно.

При рассмотрении диаграмм (фиг. № 10) теоретических напряжений и диаграмм средних опытных напряжений, полученных из показаний всех приборов, обращает на себя внимание закономерное по всему протяжению диаграмм смещение по ходу надвигки паровоза теоретических диаграмм по отношению опытных, за исключением максимально-положительных напряжений, которые для обеих диаграмм получились совмещенно. До накопления достаточного опытного материала по определению статических напряжений в рельсах в настоящее время еще затруднительно говорить о причинах этого явления. Возможно, что здесь сказалось направление надвигки паровоза с одновременным запаздыванием явлений деформаций элементов пути, тем более, что отсчеты по приборам производились тотчас же по остановке паровоза. Этому объяснению несколько противоречит совпадение максимальных положительных ординат диаграмм, теоретических и опытных. Для выяснения этого явления в предстоящих повторных опытах по определению статических напряжений будут таковые определены не только для положений осей паровоза в точности над приборами, но и при несколько сдвинутом по отношению их положении.

#### § 4. Основные выводы.

Подводя итог всему изложенному в настоящей работе, полезно будет остановиться еще раз на перечислении тех основных положений о работе рельса типа III-а под статическим воздействием на него паровоза серии С<sup>У</sup>, которые получили уже достаточное освещение произведенными в 1927 году опытами Путьевого Испытательного Бюро НТК.

1. Максимальные напряжения, возникающие в подошве неизношенных рельсов нормального типа III-а под статическим воздействием на него полногрузного паровоза серии С<sup>У</sup> не превосходили  $+ 1091 \text{ кг/см}^2$  и  $- 430 \text{ кг/см}^2$ .

2. Напряжения, возникающие в рельсе, имеют знакопеременный характер, причем основные (для подошвы рельса растягивающие) напряжения раза в два-три получились более соответствующих напряжений противоположных знаков.

3. При изучении распределения напряжений вдоль рельса, возникающих в нем под стоящим паровозом серии С<sup>У</sup>, обращает на себя внимание большая перенапряженность рельса в сечении его под задней поддерживающей осью (0<sub>2</sub>) этого паровоза по сравнению с величинами напряжений его, возникающих под всеми остальными осями этого же паровоза, что может быть объяснено большой перегруженностью этой обособленной оси паровоза. При конструировании новых паровозов и, в частности, при назначении расстояний между осями их и при назначении нагрузок на эти оси должно обращать особое внимание на учетывание их возможного будущего воздействия на путь.

4. Величины наблюдаемых максимальных основных опытных напряжений, возникающих в подошве рельса типа III-а под паровозом серии С<sup>У</sup>, получаются значительно ниже величин соответствующих теоретических напряжений, получаемых для этого же рельса по принятому в настоящее время методу расчета рельсов по инфлюэнтным линиям изгибающих моментов. При чем это отклонение в среднем для максимальных основных напряжений по материалам настоящих опытов доходило до 97,6%, при принятом при расчете коэффициенте постели шпалы С в  $4 \text{ кг/см}^3$ . Установить истинную причину этого явления в настоящее время за недостаточностью опытного материала еще затруднительно.

## Влияние колебаний температуры на рельсовый путь.

Колебания температуры рельсов, уложенных в пути, сказываются в двух основных явлениях: 1) изменение длины рельсовых звеньев влечет за собой продольное перемещение их концов и изменение размеров стыковых зазоров, 2) сопротивлению продольным перемещениям рельсов, оказываемые по всей длине звена трением от прижатия костылями подошвы рельса к подкладкам и шпалам, а на концах звена — трением между поверхностями прижатия рельса и стыковых накладок, стянутых стыковыми болтами, вызывают появление в рельсах продольных сжимающих или растягивающих усилий. Эти два явления — удлинение рельсовых звеньев и возникновение в них продольных усилий — проявляются одно за счет другого, так что полный эффект изменения температуры рельса определяется суммарной величиной того и другого явления.

Введя обозначения:

$l$  — длина рельсового звена;

$\alpha$  — коэффициент линейного расширения рельсовой стали ( $\alpha = 0,0000108$ ),

$E$  — модуль упругости рельсовой стали ( $E = 2,15 \cdot 10^6 \text{ кг/см}^2$ );

$t$  — изменение температуры рельса против начального значения ее, при котором рельс не напряжен и имеет длину  $l$ ;

$\delta$  — суммарное смещение обоих концов рельсового звена, т. е. наблюдаемое действительное удлинение (или укорочение) звена;

$P$  — продольное усилие в рельсе;

$\omega$  — площадь сечения рельса, мы можем написать следующее соотношение:

$$\alpha l t = \delta + \frac{1}{E\omega} \int_0^l P dx \dots \dots \dots (1^*)$$

Второй член правой части этого уравнения выражает собою ту долю температурного удлинения рельса, которая поглощается указанными выше сопротивлениями перемещениям его за счет возникновения в нем продольных усилий  $P$ . Величина этих усилий и вызываемых ими напряжений в рельсе, переменность их на длине одного рельсового звена и целого участка пути, а также условия возникновения этих усилий явились основной темой наблюдений, поставленных Путевым Испытательным Бюро НТК летом 1926 года на соединительной ветке М.-Курской и Октябрьской ж. д. и летом 1927 года на ст. Конотоп М.-Киево-Воронежской ж. д.

На Курско-Октябрьской соединительной ветке наблюдения были поставлены на закрытом для движения тупиковом пути, проходящем по выемке с близко расположенными строениями. Это обстоятельство создавало условия несвоевременного, а иногда частичного затенения наблюдаемого пути, что не желательно при температурных наблюдениях. При выборе места для наблюдений на ст. Конотоп это обстоятельство было учтено и для наблюдений был взят один из путей товарного парка на большой открытой площадке.

Наблюдения на Курско-Октябрьской соединительной ветке были произведены с 8 по 14 июля 1926 г. и охватывали собою измерение температуры рельсов и наружного воздуха и определение температурных напряжений в рельсах типа П-а. Наблю-

<sup>1)</sup> Удлинение рельса, могущего свободно удлиняться и укорачиваться при изменении температуры,  $\delta_0 = \alpha l t$ ; при неполном удлинении рельса только на  $\delta$ , часть удлинения  $\delta_0 - \delta = \alpha l t - \delta$  перешла в напряжение на сжатие рельса; обозначим усилие, вызываемое

<sup>2)</sup> то напряжение через  $P$ ; тогда  $(\alpha l t - \delta) = \frac{1}{E\omega} \int_0^l P dx$ .

дения производились круглые сутки. Измерения смещений концов рельсовых звеньев в этих наблюдениях не производилось и, при малой продолжительности их, они дали сравнительно небогатый материал, но послужили первым и весьма полезным опытом для выработки метода исследования температурного режима рельсового пути.

Наблюдения, поставленные на ст. Конотоп, как по обему произведенных измерений, так и по продолжительности их (с 27 июля по 28 августа) были более обширны и дали большой цифровой материал, послуживший опытной базой для выводов настоящей статьи. В Конотопе удалось поставить опыты по изучению температурных напряжений и удлинений сваренных плетей из рельсов типа III-а на специально уложенном и закрытом для движения пути, а также наблюдение над изменением стыковых зазоров на участке двух главных эксплуатируемых путей, уложенных из сваренных рельсов.

В наблюдениях по изучению температурного режима рельсового пути нами измерялись три основных фактора: 1) температура рельсов, наружного воздуха и поверхности балласта, 2) сопротивления перемещениям рельсов и вызываемые ими напряжения в рельсах, 3) удлинения рельсов. Подобные наблюдения освещают в достаточной мере вопрос о воздействии колебаний температуры на рельсовый путь, находящийся в нормальном, не опасном для движения состоянии. Если на участке пути, в пределах которого рельсовые звенья лишены возможности при повышении температуры удлиняться (напр. вследствие сгонки стыков или при чрезмерно туго затянутых стыках) температура рельсов достигнет высокого предела, то сжимающие напряжения в рельсах могут дойти до значения, опасного в отношении устойчивости пути. Может произойти выбрасывание пути в сторону, т.-е. явление продольного изгиба рельсового пути. Это явление, как с теоретической стороны, так и со стороны практических обследований и наблюдений, до сих пор еще недостаточно изучено, несмотря на то, что подобное температурное выбрасывание пути в сторону многократно являлось причиной серьезных крушений. Изучение этого явления теперь особенно своевременно ввиду начатых попыток перехода к пути со сваренными стыками, в котором длинные сваренные рельсовые плети могут находиться в более невыгодных в отношении свободы перемещения условиях, нежели рельсовые звенья теперешнего нормального типа пути.

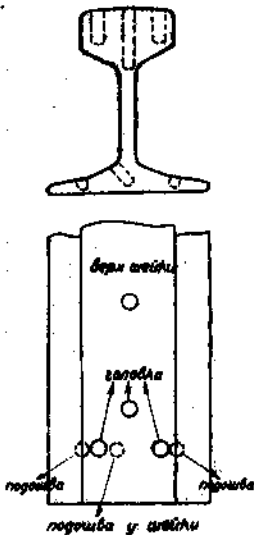
Из серии опытов по изучению устойчивости пути, намеченных Путевым Испытательным Бюро НТК, до сих пор произведены лишь опыты по определению сопротивления шпал боковому (поперек пути) смещению. Эти данные дают суждение о величине тех сопротивлений, которые должна преодолеть шпала, перемещающаяся вместе с рельсами при температурном вылучивании пути. В дальнейшем предполагено поставить опыты по определению сопротивления костылей отжатию и непосредственные испытания звеньев пути на продольный изгиб. Изучение сопротивления костылей отжатию интересно в данном случае с той стороны, что при начале вылучивания пути, пока поперечное усилие, передаваемое от рельса на шпалу через костыль, не достигнет значения, равного сопротивлению бокового смещения данной шпалы, продольный изгиб рельса будет происходить в условиях бруса с поперечными сосредоточенными упругими сопротивлениями (или, приближенно, — в условиях упругой среды). Теоретический анализ явления продольного изгиба рельса, как бруса с поперечными упругими сопротивлениями, дан в § 4 настоящей статьи, причем в соответствующих подсчетах использованы цифры, взятые из диаграмм отжатия костылей, любезно предоставленных автору Начальником Опытного Участка М.-К.-В. ж. д. инж. В. П. Крачковским, полученных им в результате опытов по изучению указанного явления.

Первые же три параграфа касаются результатов произведенных наблюдений по изучению температурного режима пути и расположены в соответствии с перечисленными выше тремя основными вопросами, освещенными этими наблюдениями.

## § 1. Температура рельсов.

Измерением температуры рельсов желательнее было изучить, с одной стороны, величину перегревания рельса сравнительно с окружающим воздухом через лучепоглощение, а с другой стороны—распределение температур по сечению рельса. Постановка

измерений была такова: в специально уложенном по оси пути рельсе-коротыше типа III-a были высверлены 7 цилиндрических гнезд по схеме, показанной на фиг. 1. В эти гнезда была налита ртуть и поставлены ртутные химические термометры, указывающие температуру той части сечения рельса, в пределах которой находилась ртуть, налитая в гнездо. Как видно из фиг. 1, температура рельса измерялась в трех точках головки рельса, в шейке рельса и в трех точках в пределах подошвы рельса.



Фиг. 1.

Все термометры, примененные для наблюдений, были предварительно подвергнуты сравнительному испытанию, причем показания по отдельным термометрам отличались друг от друга весьма незначительно (в пределах десятых долей градуса), так что поправок в их показания при наблюдениях вводить не было необходимости.

Гнезда для установки термометров были высверлены вблизи торца рельса-коротыша и для избежания влияния дополнительного нагревания рельса через лучепоглощение с торца по обоим концам его были уложены с небольшим зазором рельсовые звенья того же типа, закрывавшие от действия солнечных лучей торцы рельса-коротыша.

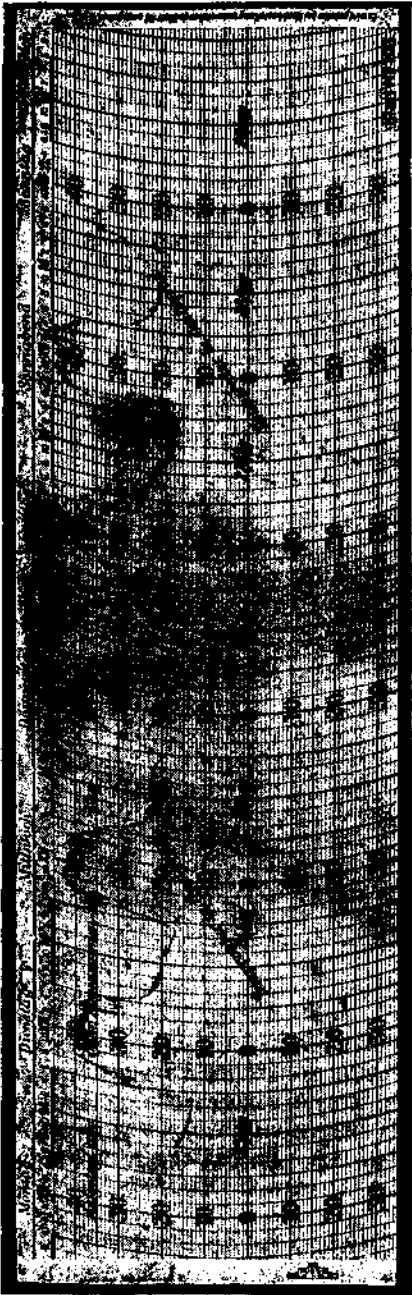
Рельс-коротыш был уложен по оси пути против середины того рельсового звена, напряжения и удлинения которого наблюдались. Условия нагревания рельса-коротыша были вполне идентичны с условиями нагревания рельса, подвергнутого наблюдениям, и во всех приводимых ниже выкладках распределение температур по сечениям испытуемого рельса на всей его длине принималось таким же, как и в рельсе-коротыше.

Одновременно с измерением температур рельса производились наблюдения температуры воздуха по спиртовому воздушному термометру, помещенному на высоте около 1,5 м над поверхностью земли. В дневное время, когда термометр подвергался нагреванию от непосредственного действия солнечных лучей, он был всегда перед каждым отсчетом обращен своей шкалой к солнцу. Правильнее сказать, им измерялась не температура воздуха, а его собственная температура. Вполне очевидно, что дневные показания этого термометра давали преувеличенные результаты сравнительно с тем, что получают метеорологические станции, измеряющие температуру наружного воздуха при помощи термометра, помещенного в психометрической будке. Однако, для суждения о температуре рельса, если не имеется данных из специально поставленных наблюдений, правильнее пользоваться показаниями термометра, не защищенного, как и рельс, от действия солнечных лучей. Таким именно образом измеряется температура линейными агентами с целью назначения потребной величины стыковых зазоров при укладке новых рельсов или при разгонке стыков. Как видно из приводимых ниже диаграмм температур показания этого воздушного термометра в наиболее жаркое время дня (12—14 час.) были все же ниже показаний термометров, измерявших температуру рельса.

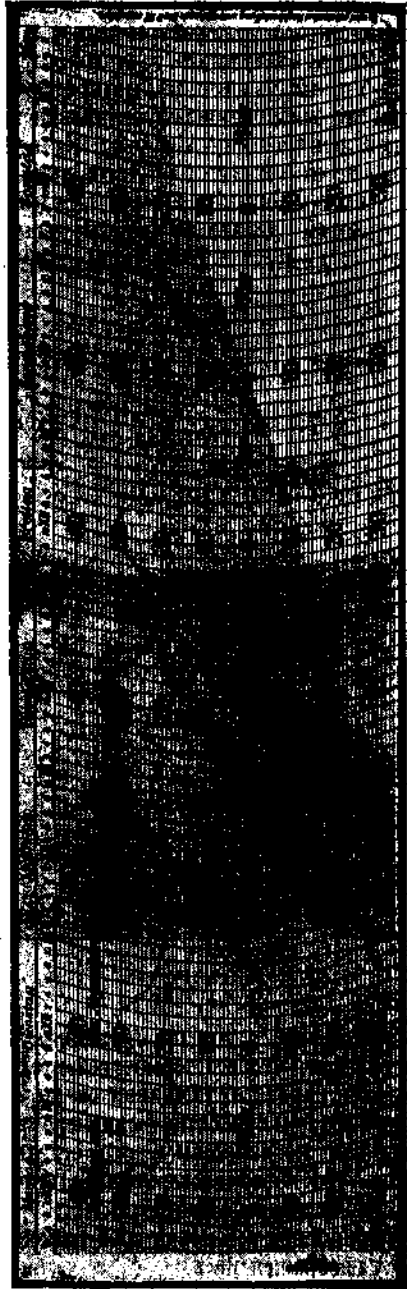
Помимо измерения температуры воздуха описанным способом, от имеющейся при ст. Копотоп метеорологической станции были получены данные измерения температуры воздуха при помощи термометра, помещенного в психометрической будке. По этим данным нельзя построить непрерывных кривых колебаний температуры, так как наблюдения на указанной метеорологической станции производятся лишь 3 раза в сутки — в 7, 13 и 21 час. Но все же эти данные имели для нас интерес, так как дали возможность судить о превышении температуры рельса над истинной температурой воздуха в наиболее жаркое время дня.

Кроме всех перечисленных термометров, на месте наблюдений были установлены два термографа фирмы Fuess: один для записи температуры воздуха, а другой — для записи температуры поверхности балласта.

Первый из них был установлен таким образом, что термочувствительная подкова его, температурные деформации которой передаются зависящему механизму, была, также как и воздушный термометр, открыта для непосредственного действия солнеч-



Фиг. 2.



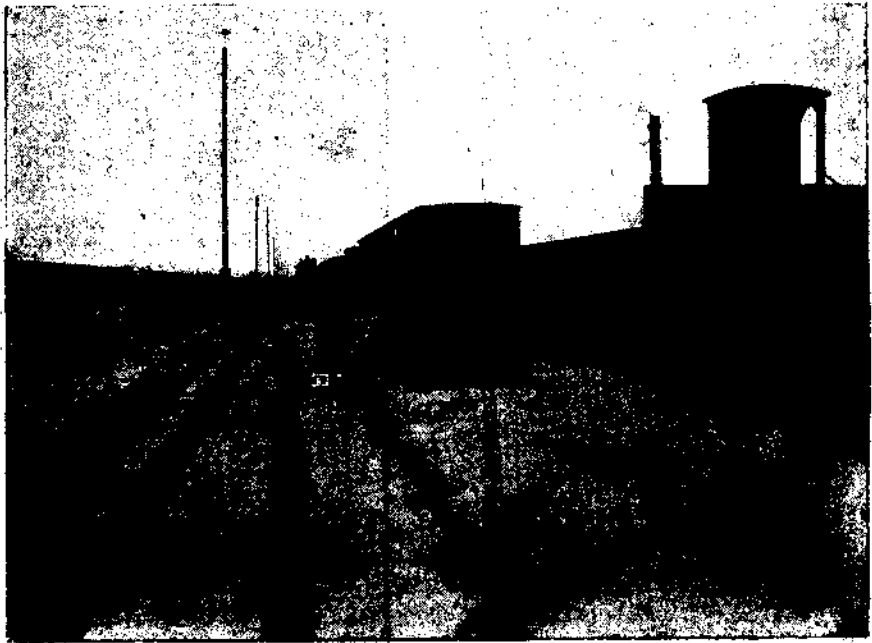
Фиг. 3.

ных лучей. Ввиду того, что термочувствительная подкова этого термографа весьма быстро реагирует на изменение условий обогрева ее, диаграммы, записанные термографом, имеют характерное зубчатое очертание и служат наглядным изображением



переменяющихся условий обогрева рельса от действия солнечных лучей и охлаждения его набегающими воздушными течениями (см. фиг. 2). Рельс, обладающий большим значением отношения массы его к поверхности лучепоглощения, чем подкова термографа, сильнее аккумулирует полученную теплоту и медленнее реагирует на изменение условий обогрева. Вследствие этого легче было улавливать максимальные и минимальные температуры рельса.

Записи воздушного термографа с первых же дней показали, что период с 20—21 ч. до 4—5 ч. следующего дня не представляет ничего интересного для наблюдений, так как за это время температура плавно понижается до своего минимума, который обычно наблюдался около 4—5 ч. утра. Вследствие этого производство наблюдений было ограничено периодом от 4—5 часов утра до 8—9 час. вечера, причем отсчеты по приборам делались нормально через каждый час. При неожиданных изменениях температурных условий делались промежуточные отсчеты, а при явно плавном движении температуры промежутки между отсчетами делались иногда и больше, чем в 1 час.



Фиг. 4.

Термограф для записи температуры поверхности балласта был установлен таким образом, что его термочувствительный наконечник воспринимал температуру верхнего слоя балласта, толщиной около 7 см, равной высоте наконечника. Записи этого термографа при обработке были нанесены на общие диаграммы температур, приводимые ниже. Там же нанесены в виде отдельных точек данные метеорологической станции о температуре поверхности земли. Типичная диаграмма, снятая балластным термографом, изображена на фиг. 3.

Общий вид установки для температурных наблюдений на ст. Копотоп М.-К.-Ворж. д. изображен на фиг. 4, а установка термометров для измерения температуры рельсов изображена на фиг. 5.

Наблюдения, произведенные в июле 1926 г. на Курско-Октябрьской соединительной ветке в Москве, отличались лишь тем, что не было термографов. В остальном наблюдение температур было тождественно с приведенным описанием.

Данные, полученные в виде записей измерения температур, нанесены на диаграммы, изображенные на фиг. 6—14. Из них диаграмма фиг. 6 относится к опытам на Курско-

Октябрьской соединительной ветке, а остальные—к опытам на ст. Контотоп. Эти диаграммы дают наглядное представление как о соотношении температур рельса и наружного воздуха, так и о распределении температур по сечению рельса.

Из этих диаграмм можно, как правило, констатировать, что днем температура рельса выше, а ночью ниже температуры наружного воздуха, измеренной как по открытому термометру, так и по термометру, заключенному в психрометрической будке. Температура воздуха по открытому термометру в наиболее жаркое время дня имеет среднее значение между температурой рельса и истинной температурой воздуха. Наибольшая температура по сечению рельса обычно наблюдается в шейке его (иногда в головке), хотя разница температур шейки и головки в жаркое время дня выражается десятками долями градуса.



Фиг. 5.

Наибольшая разница максимальной температуры в сечении рельса и температуры наружного воздуха по открытому термометру наблюдается 2 августа в 13 час. и составляет  $52,3^{\circ} - 35,9^{\circ} = 16,4^{\circ}$ , а соответствующая разница максимальной температуры рельса и истинной температуры наружного воздуха равна  $52,3^{\circ} - 27,1^{\circ} = 25,2^{\circ}$ .

Ночью, как указывалось, температура рельса ниже температуры воздуха; при этом распределение температур по сечению рельса оказывается более равномерным, чем днем и минимальная температура наблюдается опять таки в шейке рельса. Наибольшая ночная разница температур рельса и воздуха наблюдается 26 августа в 5 час. и составляет  $19,2^{\circ} - 16,3^{\circ} = 2,9^{\circ}$ . (Данных метеорологической станции для этого момента не имеется).

Интересна также величина суточных колебаний температуры рельса. Наибольшая разница максимальной и минимальной температур шейки рельса наблюдается 2 августа и составляет  $52,3^{\circ} - 14,9^{\circ} = 37,4^{\circ}$ .

В таблице 1 сделана сводка максимальных и минимальных температур шейки рельса и наружного воздуха (по открытому термометру), а также разниц между этими температурами и полусуточных колебаний за весь период наблюдения.

Распределение температур по сечению рельса интересно с той стороны, что соответственно с температурой рельса распределяются и вызываемые ею напряжения.

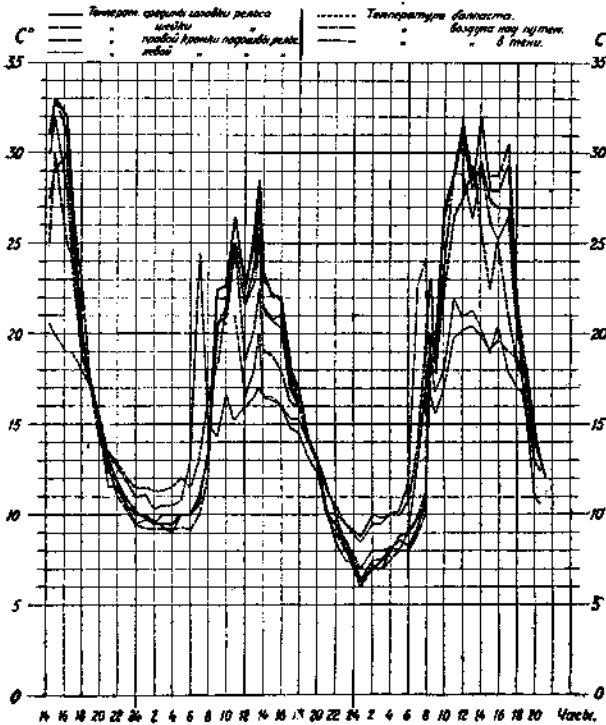
Подсчет температурных напряжений производится в предположении, что каждое волокно рельса, имеющее заданную температуру, сохраняет свою начальную длину и остается прямолинейным. При неравномерном обогрениии рельса температурные напряжения по всему сечению приведутся не только к продольному усилению, но еще и к моменту, величина которого определяется разностью температур в сечении рельса. На

фиг. 15 приведена типичная эпюра дневных температур в рельсе. Из нее видно между прочим, что распределение температур в сечении рельса происходит, вообще говоря, не по закону плоскости. Распределение температурных напряжений, следовательно, отличается от распределения напряжений от изгиба в нашем обычном о нем представлении. Но при любой эпюре распределения температурных напряжений они приведутся к одной равнодействующей, приложенной эксцентрично по отношению к центру тяжести сечения рельса, т.-е. создадут продольное усилие и момент. Необычайное же распределение напряжений объясняется тем, что в данном случае внешний фактор (момент) является

Н. Т. И.

Путевое Испытательное Бюро.

Суточные колебания температуры в рельсе типа II<sup>а</sup> по наблюдениям 8-10 июля 1926 г. на Курско-Нитябрьской соедин. ветке.



Фиг. 6.

верхность балласта имеет более низкую температуру, чем рельс, причем разница указанных температур достигает 15° — 17°. Само собой разумеется, близость балласта оказывает известное охлаждающее влияние на рельс, особенно на подошву его. На главных путях ст. Конотоп, где уложены сваренные рельсовые плети, с целью уменьшения нагревания рельсов подошва их и часть шейки до середины ее высоты в виде опыта были закрыты балластом. Подобная мера однако едва ли может быть признана целесообразной, так как 1) наиболее сильно нагревающаяся часть рельса — его головка и часть шейки — остаются открытыми для действия солнечных лучей и, при малой своей теплоемкости, рельс, несмотря на частичное прикрытие его балластом, будет сильно перегреваться, 2) разница температур головки и подошвы будет больше, чем обычно, вследствие чего будет больше и расстраивающее воздействие на скрепления температурного момента в рельсе, стремящегося приподнять рельс, 3) сильно усложняется осмотр и ремонт скреплений, 4) балластный валик, прикрывающий подошву рельса, от сотрясений при проходе поездов и от действия ветра и дождей быстро

функцией от внутренних температурных напряжений.

Воздействия температурных изгибающих моментов, появляющихся в рельсах, на общее состояние пути мы здесь касаться не будем. Величина разности дневных температур в сечении рельса, обуславливающая появление этих моментов, доходит по данным наблюдений на ст. Конотоп до 7°.

Подошва рельса, несмотря на то, что у нее отношение поверхности лучепоглощения в массе больше, чем у головки рельса, прогревается даже с солнечной стороны меньше, чем головка, что объясняется, очевидно, полным затенением нижней ее грани и близостью балласта. Ночью температура рельса по всему сечению примерно одинакова.

Диаграммы температуры поверхности балласта, записанные термографом и нанесенные на общие диаграммы температур, указывают на то, что днем по-

Таблица I.

ЧИСЛО И МЕСЯЦ.	Минимум t°.		Максимум t°.		Колебания t° за полусутки.		Разница t° рельса и воздуха.	
	Воз- дух.	Рельс.	Воздух.	Рельс.	Воздух.	Рельс.	Ночной минимум.	Дневной максимум.
27 июля . .		14,0	—	30,7	—	—		
28 " . .		14,0	—	45,7	—	31,7		
29 " . .		12,1	—	47,7	—	35,6		—
30 " . .		—	—	45,0	—	—		—
1 августа .	17,0	14,9	—	47,0	—	32,1	— 2,1	—
2 " .	18,0	16,8	35,9	52,3	17,9	35,5	— 1,2	+16,4
3 " .	19,0	17,7	32,7	37,0	13,7	29,3	— 1,3	+ 4,3
4 " .	19,5	19,2	33,6	44,9	14,1	25,7	— 0,3	+10,7
5 " .	18,8	16,6	—	—	—	—	— 2,2	—
6 " .	—	—	34,2	42,5	—	—	—	+ 8,3

ЧИСЛО И МЕСЯЦ.	Минимум t°.		Максимум t°.		Колебания t° за полусутки.		Разница t° рельса и воздуха.	
	Воз- дух.	Рельс.	Воздух.	Рельс.	Воздух.	Рельс.	Ночной минимум	Дневной максимум.
8 августа .	15,2	14,0	—	—	—	—	—	—
					11,9	18,0	— 1,2	
9 " .			27,1	32,0	8,7	13,5		+ 4,9
	18,4	18,5			10,8	16,5	+ 0,1	
10 " .			29,2	35,0				+ 5,8
	13,8	12,0			15,4	23,0	— 1,8	
					15,7	27,4		
11 " .			29,5	39,4				+ 9,9
	13,6	12,0			15,9	27,4	— 1,6	
					18,3	31,0		
12 " .			31,9	43,0				+11,1
	—	—			—	—	—	
17 " .			—	—				—
	17,0	15,8			10,6	22,4	— 1,2	
18 " .			27,6	38,2				+10,6
	19,0	17,2			8,6	21,0	— 1,8	
					11,8	22,8		
19 " .			30,8	40,0				+ 9,2
	19,0	18,0			11,8	22,0	— 1,0	
					19,3	25,9		
20 " .			38,3	43,9				+ 5,6
	—	—			—	—	—	
23 " .			31,4	45,3				+13,9
	21,8	20,2			9,6	25,1	— 1,6	
					14,1	26,4		
24 " .			35,9	46,6				+10,7
	21,2	19,3			14,7	27,3	— 1,9	
					15,9	29,3		

ЧИСЛО И МЕСЯЦ.	Минимум t°.		Максимум t°.		Колебания t° за полусутки.		Разница t° рельса и воздуха.	
	Воз- дух.	Рельс.	Воздух.	Рельс.	Воздух.	Рельс.	Ночной минимум.	Дневной максимум.
25 августа .			37,1	48,6				+11,5
	19,2	16,3			17,9	32,3		
26 . . . . .			37,4	46,6				+ 9,2
	16,4	14,6			18,2	30,3	- 2,9	
27 . . . . .			37,3	48,4				+11,1
					21,0	32,0		
					20,9	33,8	- 1,8	

приходит в расстройство и распыляется. Температурных наблюдений над таким рельсом с закрытой балластом подошвой произведено не было.

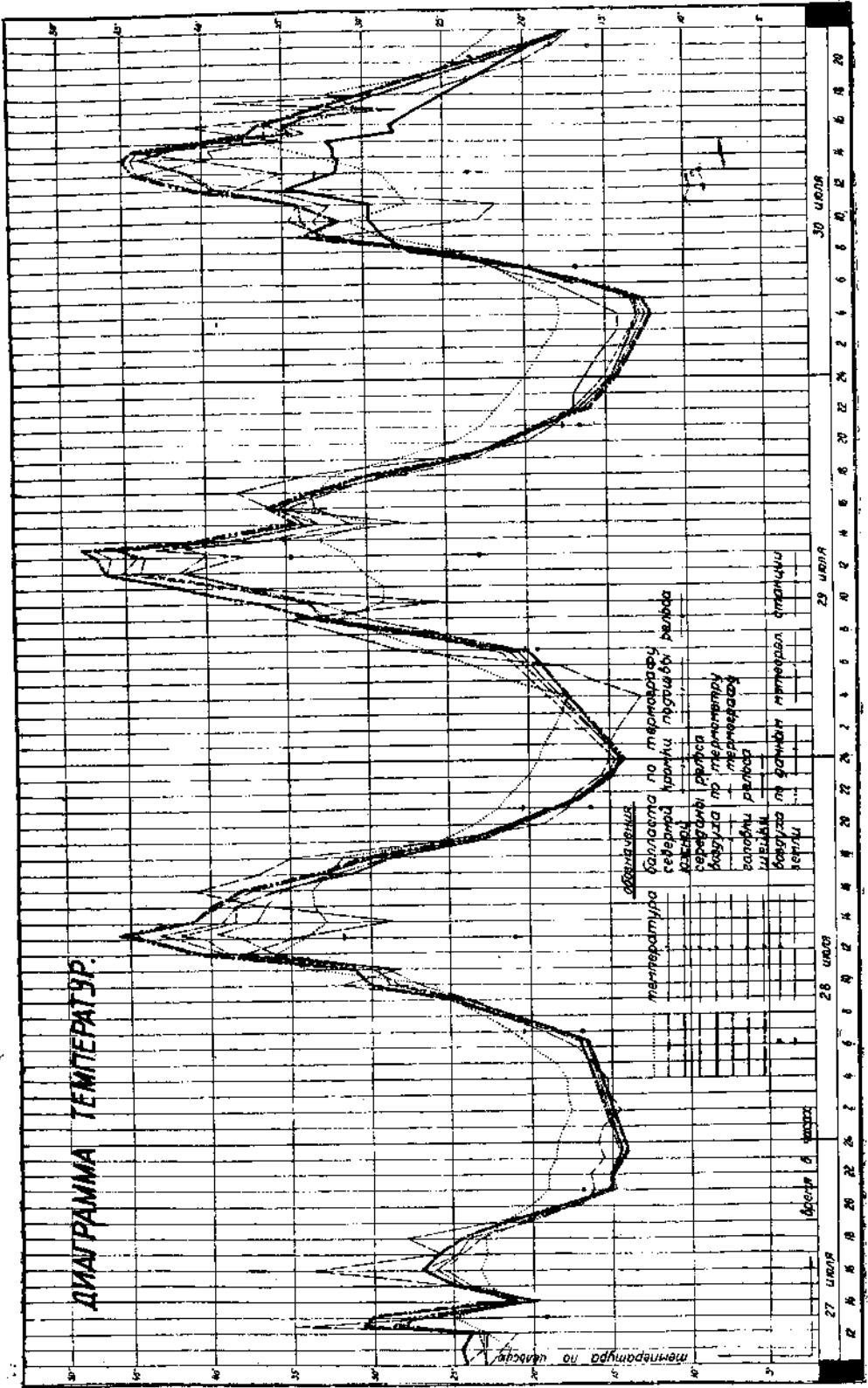
Ночью температура поверхности балласта, аккумулирующего полученную за день теплоту, обычно выше температуры воздуха и рельса.

Данные о температуре поверхности земли, полученные с Конотопской метеорологической станции, различаются с записями балластного термографа, что объясняется различием в постановке наблюдений: термограф, в силу устройства его наконечника, может измерять температуру слоя балласта, толщиной 7 см, тогда как метеорологическая станция измеряет температуру самой поверхности земли с помощью вложенного в нее горизонтального термометра.

По данным метеорологической станции в июле 1927 г. температура поверхности земли достигала максимума в 55,2°, а за известный нам максимум температуры поверхности земли для Конотопа по данным прежних наблюдений может быть принята температура в 58°. Как видим, эта температура может достигать весьма высоких значений.

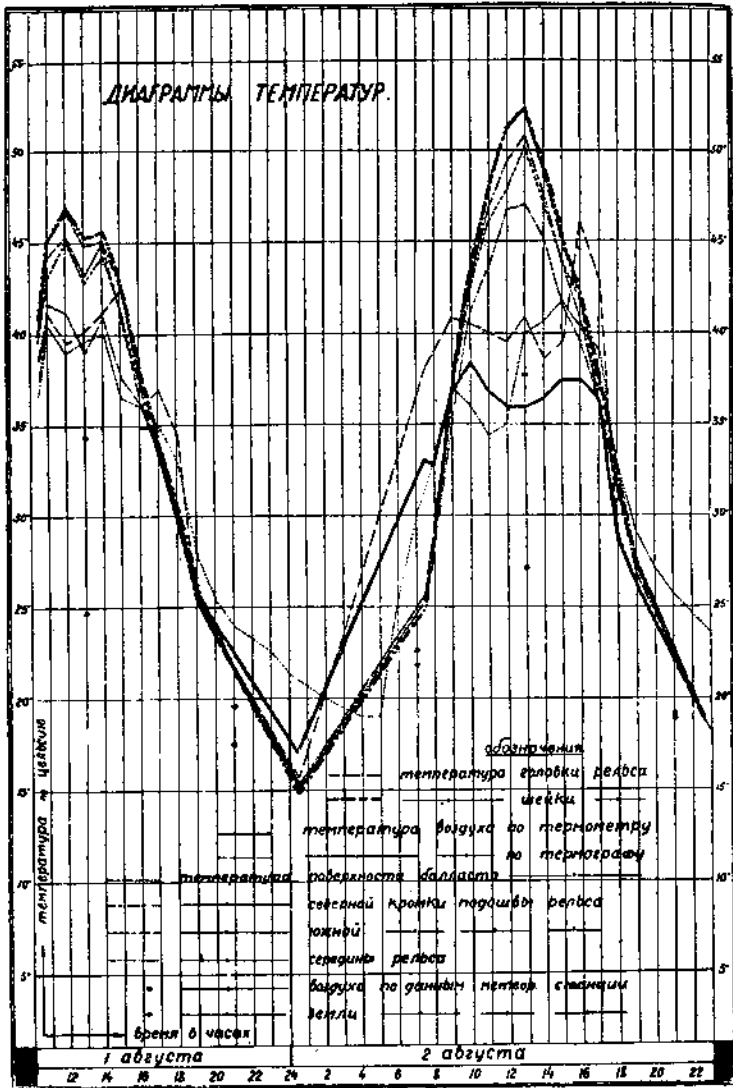
В период наших наблюдений на ст. Конотоп температура поверхности земли достигала максимума в 42,0° (25 августа), причем в этот момент температура шейки рельса была равна 48,6°. Наибольшая температура рельса, вообще говоря, выше соответствующей температуры поверхности земли и, хотя по времени максимумы указанных температур за период наших наблюдений не совпадали, все же данные метеорологической станции о наибольшей для Конотопа температуре поверхности земли в 58° говорят о том, что температура рельсов в условиях средней полосы России может быть и еще значительно выше, чем наблюденная нами в Конотопе наибольшая температура рельса в 52,3°. Степень нагревания рельса сильно зависит от состояния погоды: в тихие и безоблачные дни нагревание будет, очевидно, наибольшим. За все время наблюдений безветренных в наиболее жаркий период дней (по данным о направлении и скорости ветра, полученным с метеорологической станции) было только 2: 21-го и 25-го августа; из них 21-го облачность была сильная (балл 10), а 25-го — день почти безоблачный (балл 2). (В этот именно день наблюденна наибольшая температура поверхности земли).

Из сказанного следует, что для суждения о наибольших температурах рельсов далеко недостаточно подобного единичного наблюдения. Можно предполагать, что темпе-



Фиг. 7.

ратура рельсов в условиях средней полосы России может доходить до  $65^{\circ}$ — $70^{\circ}$  \*); однако, было бы весьма интересно вести постоянные наблюдения температуры рельсов, поручив эту работу хотя бы имеющимся на большинстве наших железных дорог метеорологическим станциям. Постановка этих наблюдений весьма несложна и требует самого



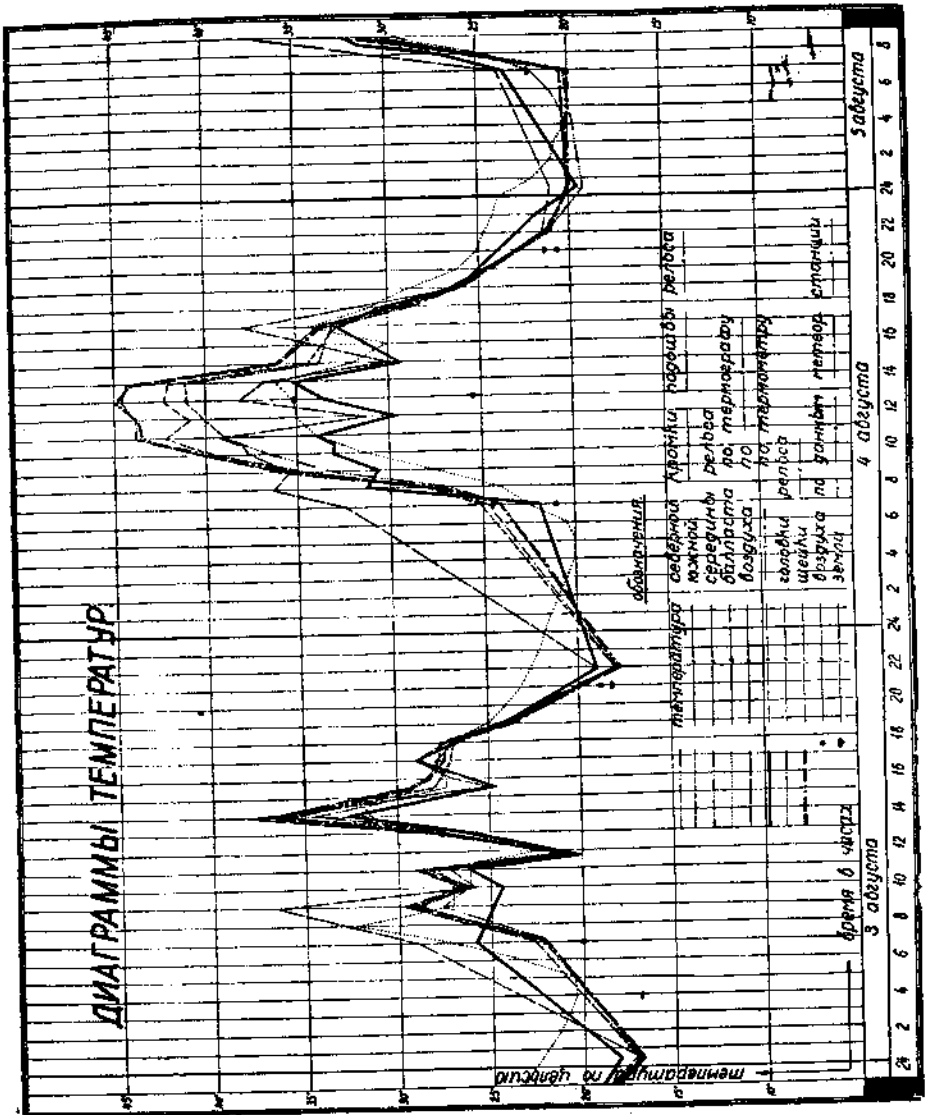
Фиг. 8.

элементарного оборудования, тогда как освещаемый ими вопрос получает первостепенное значение в связи с попытками перехода к сварке рельсовых стыков и с назревающей необходимостью усовершенствования теперешнего стыкового соединения. Постановка подобных наблюдений особенно желательна в местностях с наивысшими максимумами (и с наименьшими минимумами) температуры, а еще более—в местностях с наи-

\* Эти цифры получаются путем суммирования максимума температуры поверхности земли в  $58^{\circ}$  и разницы температур рельса и поверхности земли в дневные часы, колеблющейся в пределах  $7^{\circ}$ — $12^{\circ}$ .



более резкими суточными и годичными колебаниями температуры. Так как эти наблюдения должны быть сведены в единое целое, желательно их систематизировать и вести по общей программе и объединенным методом.



Фиг. 9.

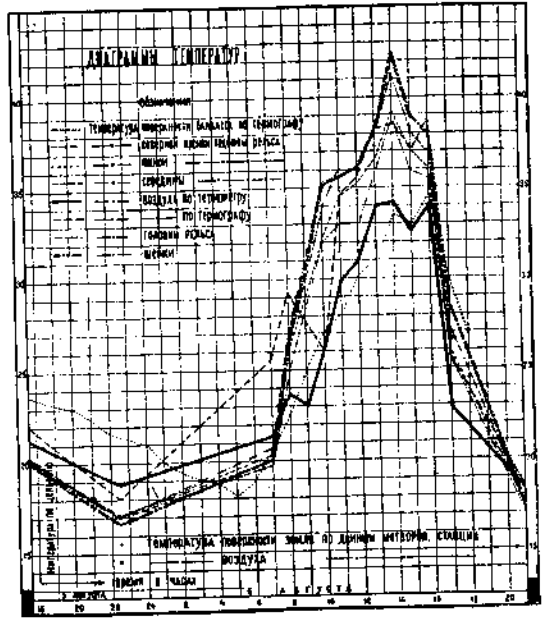
## § 2. Температурные напряжения в рельсах.

Возникновение в рельсах напряжений от изменения температуры обусловлено сопротивлением перемещению его, оказываемым скреплениями. Требования устойчивости пути против воздействия вертикальной подвижной нагрузки идут в данном случае в разрез с вопросом о прочности рельсов, ибо чем плотнее прижат рельс костылями к подкладкам и шпалам и чем сильнее затянуты стыки, тем устойчивее сопротивляется рельс воздействию подвижного состава, но в то же время тем менее способен он к удлинениям при колебаниях температуры. Предельные значения температурных усилий в рельсах на пути, находящемся в нормальных условиях содержания, определяются величиной

температуры и способностью креплений воспринять эти усилия. Дальнейшее изменение температуры уже не вызовет увеличения усилия в рельсе, ибо произойдет продольное смещение его по подкладкам и между стыковыми накладками. Вместе с этим изменится величина стыкового зазора.

Если при невысоком значении температуры стыки под действием угона рельсов окажутся согнанными до полного уничтожения зазоров, то при повышении температуры рельсы вовсе не смогут удлиняться. В этом случае ограничение величины продольного усилия в рельсе величиною сопротивлений в креплениях отпадает и рельс будет находиться в особенно невыгодных условиях в отношении появления в нем сжимающих температурных усилий. Последние могут достигнуть такой величины, что путь теряет устойчивость и выпучивается в сторону (фиг. 43).

Связи, налагаемые креплениями на свободное перемещение рельсов, проявляются: 1) в силах трения подошвы рельса по подкладкам, к которым рельс прижат костылями, 2) в силах трения концов рельса между стыковыми накладками, стянутыми стыковыми болтами. Характер возникновения этих сопротивлений, нужно думать, таков: если температура рельса начинает повышаться против начального ее значения, при котором рельс не напряжен, то стремление рельса к удлинению атрофируется сопротивлением трения в стыке, препятствующим изменению стыкового зазора. До тех пор, пока не произойдет первый сдвиг концов рельсового звена между стыковыми накладками, сопротивления трения от прижатия костылями еще не смогут проявиться.



Фиг. 10.

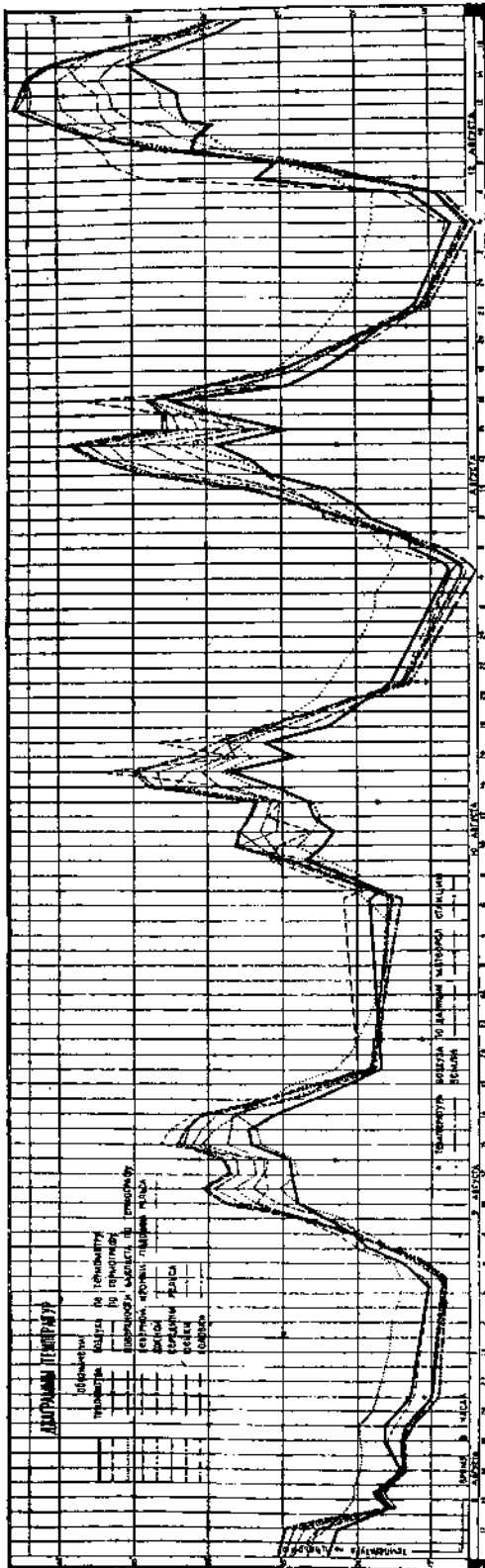
Перемещение концов рельса, как показывают наблюдения, при туго затянутых стыках происходит скачком.

Так как сопротивления трения в стыках в силу различной степени натяжения болтов, различны по величине, то соответствующие перемещения концов рельсовых звеньев происходят в разное время и при различных значениях температуры. В первую очередь изменяется зазор в наиболее слабо затянутом стыке. В непосредственной близости к этому стыку продольное усилие в рельсе падает до значения, на котором оставит его сопротивление трения в стыке. По обе стороны от этого стыка продольное усилие возрастает за счет проявившихся после начала смещения концов рельса сопротивлений трения от прижатия подошвы рельса костылями. Таким образом это последнее сопротивление обуславливает переменность значения продольных усилий в рельсах и уменьшает температурный угон рельсов в места с наиболее слабо затянутыми стыками.

Из сказанного ясно, что максимум температурных усилий в рельсе обуславливается сопротивлениями трения в стыках. Сопротивление трения от прижатия костылями, проявляющееся только после начала перемещений рельсовых звеньев, т. е. после того, как продольное усилие в рельсе начало падать, с точки зрения изучения максимума температурных усилий, нас не интересует.

Сопротивление трения в стыке, зависящее от усилий натяжения стыковых болтов, числа их на полунакладке и от угла наклона граней соприкасания накладки с рельсом, может быть определено формулой:

$$F_1 = \frac{2Q}{\sin \varphi} \cdot f \cdot n \dots \dots \dots (2)$$



Фиг. 11.

где  $Q$  — сила натяжения болта,  $\varphi$  — угол наклона граней соприкасающейся накладки с рельсом к оси болта,  $f$  — коэффициент трения накладки по рельсу,  $n$  — число болтов на полукладе. Для шестидырных накладок типа I-а, II-а и III-а, имеющих  $tg \varphi = 1/3$ , при  $f = 0,30$  будем иметь

$$F_1 = 5,7 \cdot Q \dots \dots \dots (3)$$

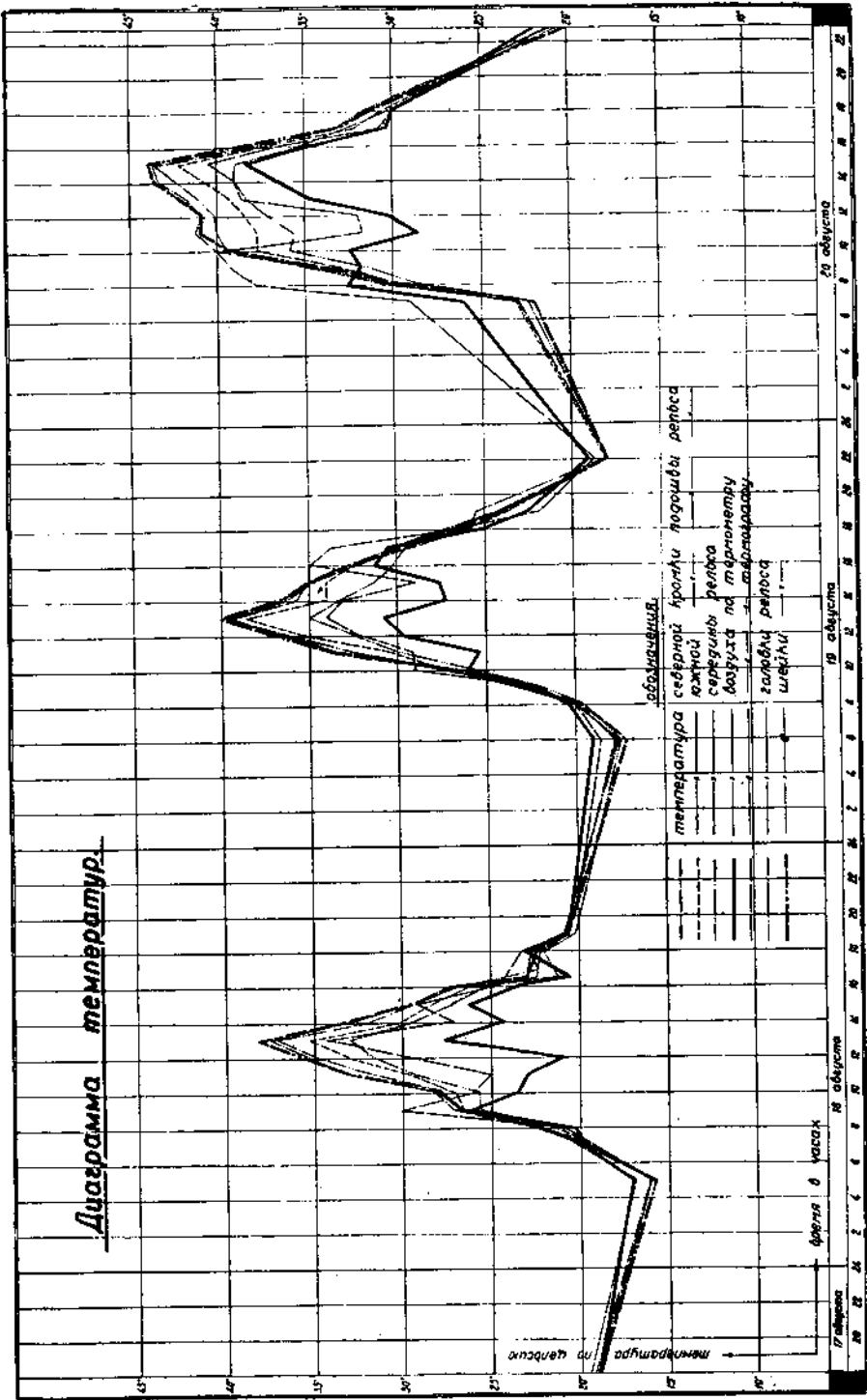
Сила натяжения стыкового болта  $d = 22$  мм при затягивании его ключом длиной 60 см, часто применяемым на наших дорогах, может доходить до 4—5 т, что соответствует сопротивлению трения в стыке:

$$F_1 = 5,7 \cdot Q = \text{от } 22,8 \text{ до } 28,5 \text{ т.}$$

Экспериментальное исследование величины сопротивления трения в затянутых стыках предполагается поставить в лабораторной обстановке\*), где как сопротивление стыка, так и сила натяжения болтов могут быть определены с достаточной степенью точности.

В полевых наблюдениях на ст. Кокотоп нами были сделаны первые попытки непосредственного определения величины указанных сопротивлений путем растяжения стыка при одной паре затянутых болтов при помощи лебедки и полиспаста и измерения растягивающих усилий с помощью динамометра, поставленного в одну из ниток полиспаста. Для того, чтобы получить достаточной величины растягивающее усилие в стыке, пришлось ставить полиспаст в 10 ниток. В первой нитке полиспаста, соединившей его с лебедкой, был поставлен пружинный динамометр со шкалой на 1200 кг. Было замечено, что натяжение последних (считая от лебедки) ниток полиспаста было значительно более слабым, чем натяжение первых ниток. Постановкой второго

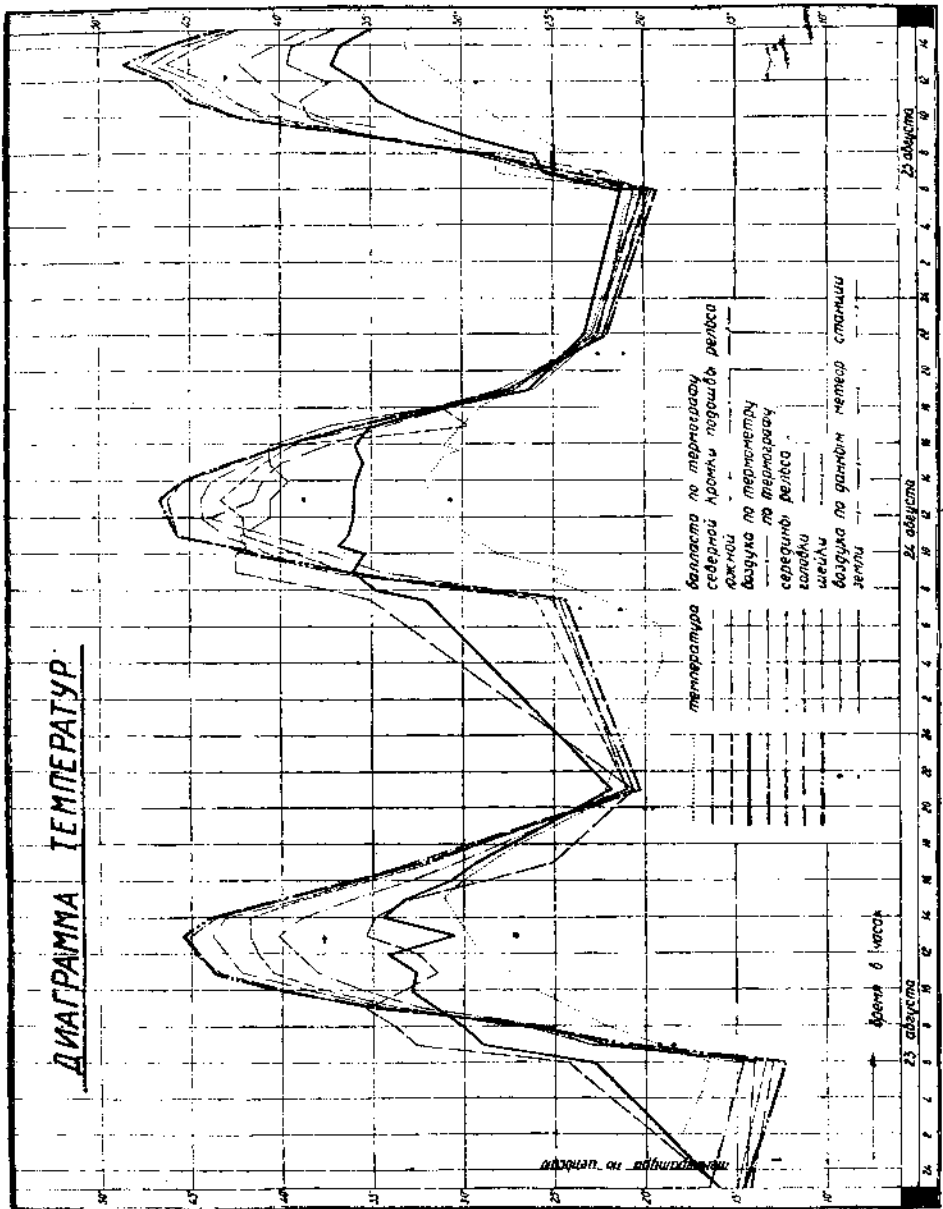
\*) Подобные опыты, со специальной целью исследования сопротивления смещению рельсов в стыке сист. Melain производились Prof. Dr. —Ing. Otto Ammann'ом в Karlsruhe. См. Organ f. d. F. d. E. 1927 г., № 5.



Фиг. 12.

динамометра на последней нитке полиспаста удалось определить коэффициент полезного действия последнего, который оказался равным  $\approx 0,70$ .

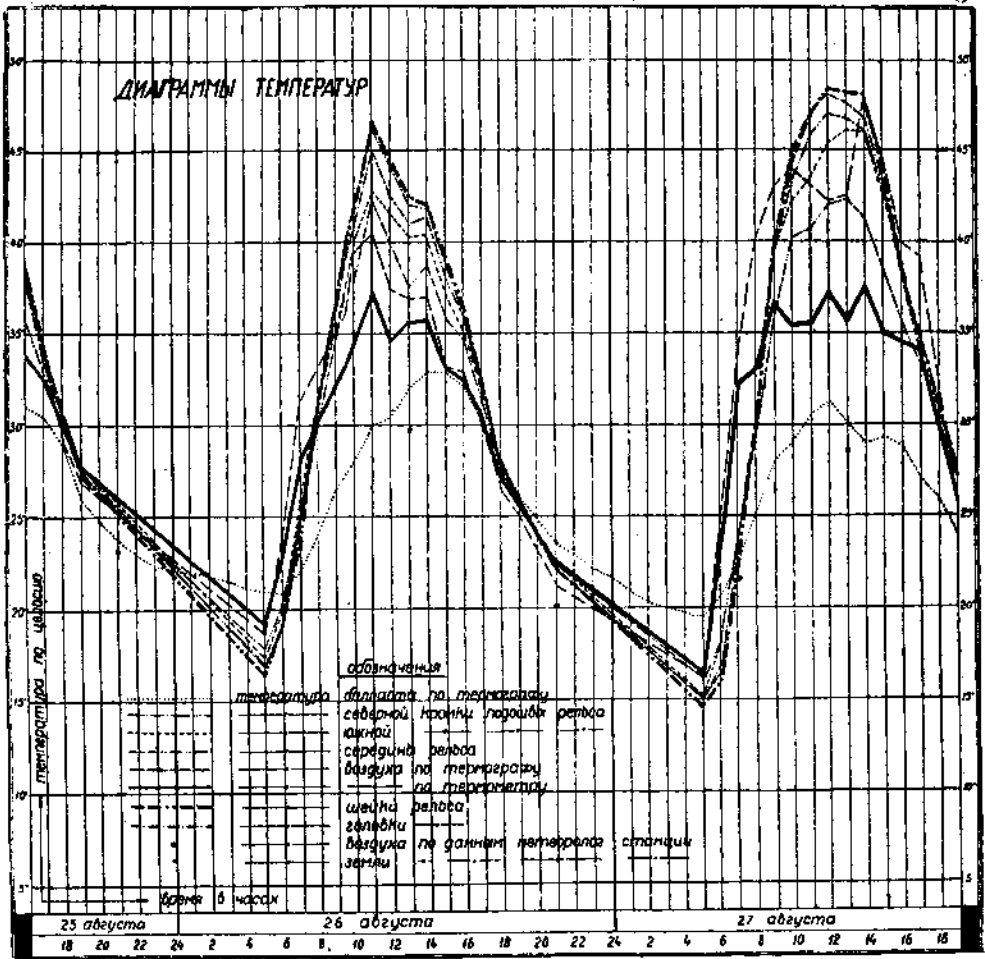
Определить степень натяжения стыковых болтов, за отсутствием соответствующих приспособлений, не удалось. Болты затягивались несколькими путевыми рабочими «до отказа», причем из 11 наблюдений только в двух удалось добиться смещения рельсовых концов в стыке, при усилии в рельсе в первом случае 4900 кг, а во втором — 7140 кг.



Фиг. 13.

В остальных случаях при натяжении рельса до усилия в 5600 кг, а в двух случаях даже до 8000 — 9000 кг, смещение концов рельсов между накладками наблюдалось лишь при ударах по рельсу костыльным молотком. Это смещение протекало мелкими толчками (от каждого удара по 0,5 — 0,05 мм, в зависимости от силы натяжения) и прекращалось после падения усилия в рельсе до 3000 кг.

Полученные цифры сопротивления трения в стыке, вызываемого натяжением одной пары болтов, указывают на то, что действительное сопротивление стыка, перекрытого)



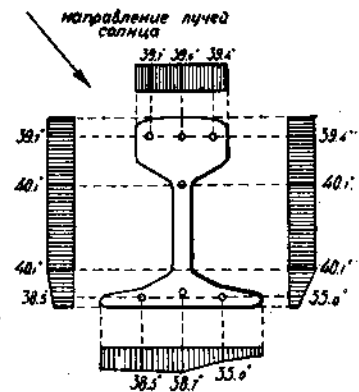
Фиг. 14.

шестиугольными стыковыми накладками, близко к тому, что дает нам приведенный выше теоретический подсчет. Соответствующие значения температурных напряжений в рельсах могут доходить, напр., для рельсов типа III-a:

$$\pm n = \frac{E_1}{\omega} = \frac{28500}{42.76} = 666 \text{ кг/см}^2$$

т.е. до значения, с которым нельзя не считаться при расчете рельсов на прочность.

Сопротивление трения при скольжении подошвы рельса по подкладкам, интересное с точки зрения переменности величины усилия по длине рельсового звена, определенное также при помощи лебедки, полилиаста и динамометра, выражается следующими цифрами, приведенными в таблице II:



Типичная зона распределения температур по освещению рельса.

Фиг. 15.

Приведенными в таблице II:

Таблица II.

СОСТОЯНИЕ ПУТИ.	Длина рельса	Сопротивление	Сопротивление на 1 п. м пути
	м	кг	кг/м
Путь старый, сильно расшатанный, на старых шпалах . . . . .	8,54	500—1300	60—160
Путь тот же, костыли заново добыты . . . . .	8,54	2500—3000	300—360
Рельс заново прибит к старым шпалам . . . . .	12,50	3400—4300	270—340
Тоже (рельс двигался лишь при ударах костыльным молотком) . . . . .	44,00	5600	130

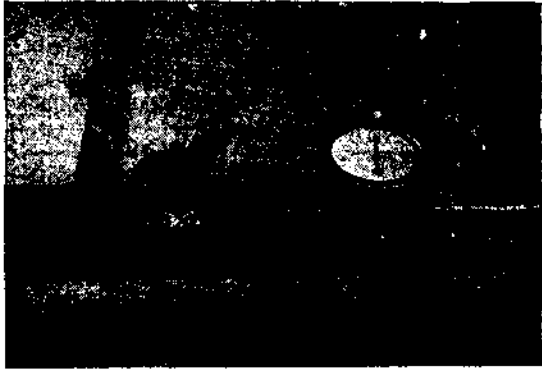
Из этих цифр можно видеть, что для пути среднего качества сопротивление скольжению рельса по подкладкам, приведенное к одному *пог. м* пути, может быть принято равным около 300 *кг/м*. Следовательно, рельсовая нитка длиной около 100 м достаточна для того, чтобы при совершенно свободном одном конце ее воспринять реакцию от напряженного предельным усилием (около 28,5 *т*) рельсового звена, расположенного на другом конце ее. Это дает указание на возможную переменность усилий на длине непрерывной рельсовой нитки.

В наблюдениях на Курско-Октябрьской соединительной ветке в Москве и на ст. Кюкотоп наряду с температурой рельсов измерялись и вызываемые ею напряжения, для чего в первом случае были использованы экстензометры Рабю-Манэ, а во втором — экстензометры Н. С. Венту и в последних циклах наблюдений экстензометры типа Рабю-Манэ с измерительными коробками, изготовленными заводом б. Гаккенталь. Работа всех этих приборов, приспособленных к измерению деформаций различных частей сооружений, в данном случае основана на том, что, если прибор нагревается так же, как и рельс, то все его части свободно удлиняются, в то время как рельс, к которому прикреплен прибор, не имея возможности свободно удлиняться, сохраняет свою начальную длину между точками прикрепления прибора или лишь частично деформируется. Следовательно, показания прибора в этом случае изменяются за счет разности температурных деформаций самого прибора и рельса.

Приборы эти давали бы вполне верные показания при условии, что температура прибора (собственно говоря, его измерительной штанги или станины) в любой момент точно совпадает с температурой рельса. На самом деле этого не получается, что создает известную погрешность в показаниях приборов. Погрешность эта может быть учтена путем постановки контрольных экстензометров, прикрепленных к рельсу-коротышу, способному свободно удлиняться при изменениях температуры. Показания такого контрольного экстензометра будут, очевидно, меняться за счет разности температурных деформаций рельса-коротыша и самого прибора, так что, если испытуемый рельс и установленные на нем приборы находятся в тех же условиях обогрева, как и рельс-коротыш с контрольными экстензометрами, то показания этого последнего дадут нам необходимые поправки показаний рабочих экстензометров, установленных на испытуемом рельсе.

В опытах на Курско-Октябрьской соединительной ветке, как было указано, для измерения температурных напряжений были использованы экстензометры Рабю-Манэ. Установлены они были вдоль обеих кромок подошвы рельса в количестве четырех пар на каждом из 2 подвергнутых наблюдению рельсовых звеньев. Эти экстензометры, как

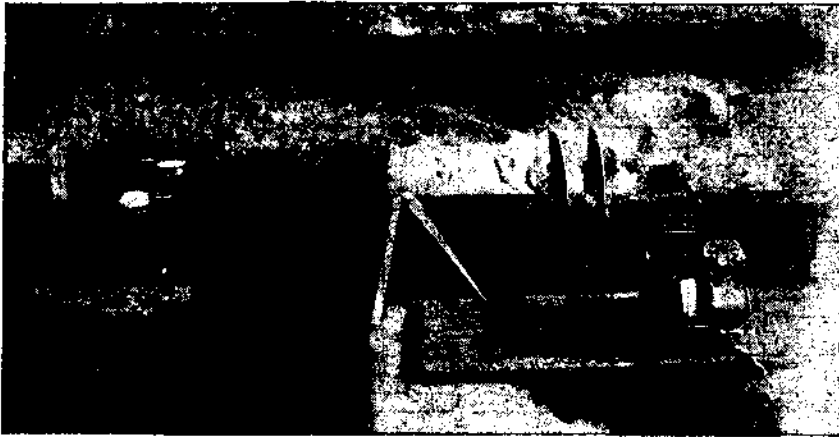
по точности, так и по характеру своей работы более удобны в применении к измерению температурных напряжений, нежели экстензометры Н. С. Вергу, примененные в Конотопских наблюдениях. На фиг. 16 представлена установка экстензометров с коробками Гаккентали на головке рельса, осуществленная в Конотопе. Установка экстензометров Н. С. Вергу видна на фиг. 17 (слева), а постановка контрольных экстензометров на том же рельсе-коротыше, в котором производилось измерение температур, видна на фиг. 5.



Фиг. 16.

При постановке измерений температурных напряжений в рельсах приходится исходить из несколько условного начального состояния рельса.

Интересно было бы начинать наблюдения над рельсом, в начальный момент совершенно не напряженным, дабы получить измерением истинную величину температурных напряжений, а не их приращение против неизвестного нам начального состояния. В конотопских наблюдениях перед производством начального отсчета по экстензомерам стыки рельсов оставались освобожденными от болтов. Следовательно, к началу наблюдения температурные напряжения в рельсе могли возникнуть лишь за счет сопротивления трения подошвы рельса по подкладкам. В рельсовых звеньях большой длины эти сопротивления могут создать довольно значительные напряжения в рельсе (см. приводимые ниже диаграммы), так что начальное состояние рельса лишь условно может приниматься не напряженным. Вследствие этого помещенные ниже диаграммы правильнее трактовать, как диаграммы изменения температурных напряжений.



Фиг. 17.

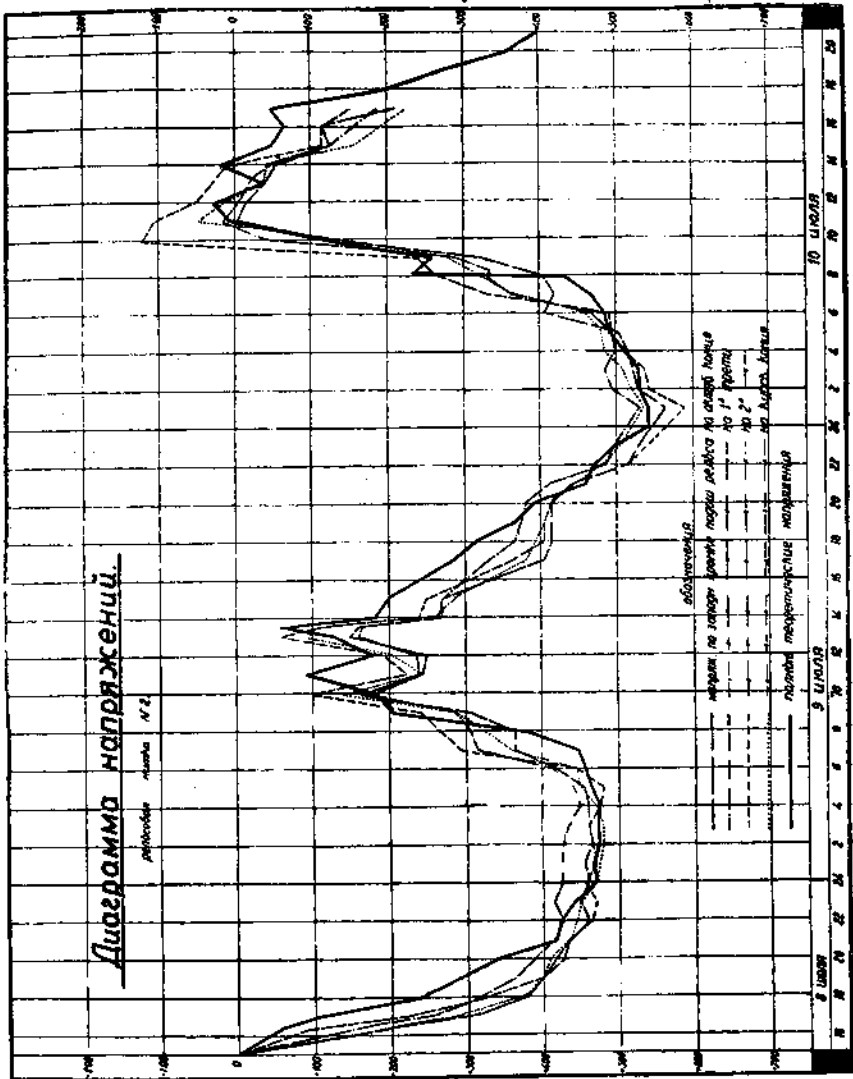
В наблюдениях на Курско-Октябрьской соединительной ветке стыки оставались затянутыми до постановки приборов и начала отсчитывания по ним, так что начальное нулевое состояние рельсов в этом случае является еще более условным.

Отсчеты по экстензомерам в обоих наблюдениях производились одновременно с измерением температуры рельсов. На основании записей отсчетов по приборам составлены диаграммы изменения температурных напряжений, приведенные на



фиг. 18-27. Из них диаграммы фиг. 18—21 касаются наблюдений на Курско-Октябрьской соединительной ветке, а остальные—наблюдений на ст. Конотоп.

В наблюдениях на Курско-Октябрьской соединительной ветке контрольных экстензометров не ставилось, так что соответствующие диаграммы содержат погрешности, обусловленные разностью температур рельса и измерительной штанги экстензометров. На этих диаграммах помимо кривых напряжений, полученных экспериментальным путем, нанесены кривые теоретических напряжений, подсчитанных в предположении.



Фиг. 18.

что подвергнутые наблюдениям рельсовые зенья все время сохраняли свою начальную длину и весь эффект температурного воздействия проявлялся в возникновении напряжений. Характерно, что на всех этих диаграммах в утренние часы экспериментальные кривые обгоняют кривые теоретических напряжений. Очевидно, это есть следствие указанной разности температур рельса и экстензометров, так как в утренние часы, когда обогревание рельса и приборов идет наиболее быстрым темпом штанги приборов, имеющие сравнительно небольшую массу, нагреваются быстрее, чем рельсы.

Наиболее характерные из диаграмм, полученных на основании опытов на Курско-Октябрьской соединительной ветви, это—диаграммы, изображенные на фиг. 18 и 19, относящиеся к одной и той же рельсовой нитке. Первая из этих диаграмм относится к первой же стадии опытов, когда под наблюдения был взят рельс, оставленный в том самом состоянии, в котором он был до производства наблюдений. (В силу этого, диаграмма показывает лишь изменение напряжений, но не их абсолютную величину). Рельсовая нитка, к которой относятся указанные диаграммы, находится вблизи кювета, в котором почти постоянно стоит вода. Наружный осмотр рельса и его стыков показал, что как самый рельс, так и стыковые накладки, болты и костыли сильно покрыты ржавчиной, что создает невыгодные условия в смысле удлинений рельсов, особенно при отсутствии движения по пути. Действительные кривые изменения напряжений (фиг. 18) для этого случая весьма близко совпадают с теоретической кривой, построенной в предположении полного отсутствия удлинений рельса.

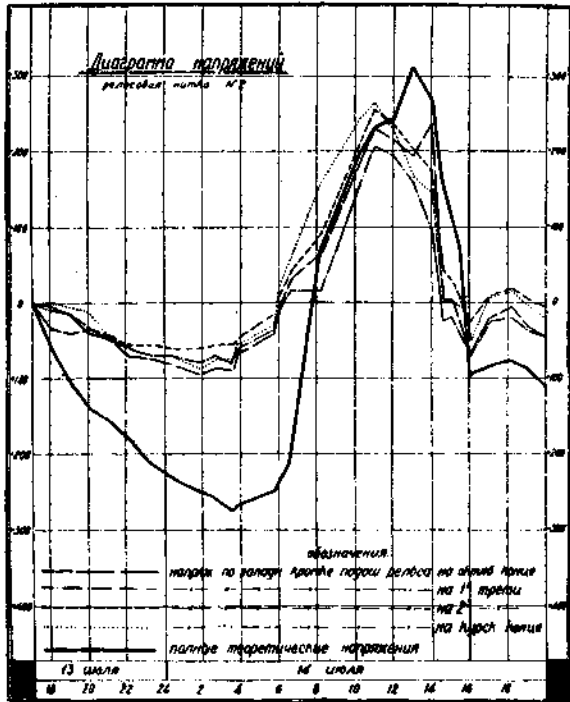
Наибольшие пределы колебаний температурных напряжений по этой диаграмме составляют  $(592 + 116) = 708 \text{ кг/см}^2$ . Наиболее выгодному предположению, что рельс не был напряжен при среднем значении температуры его за период наблюдения, соответствует величина действительных напряжений  $+354 \text{ кг/см}^2$ . При этом пределы колебания температуры, как видно из фиг. 6, были не широки.

Фиг. 19 относится к той же рельсовой нитке, но при иных условиях состояния пути: рельсовые звенья были предварительно согнаны ночью до полного уничтожения стыковых зазоров, причем приборы были установлены на среднем из 7-ми согнанных звеньев. Как видно из диаграммы (фиг. 19), прогреженные при перегонке рельсы получили способность к более свободному смещению, так как действительные напряжения в этом случае отстают от полных теоретических.

Диаграммы (фиг. 20 и 21) относятся к таким же двум стадиям наблюдений над другой рельсовой ниткой.

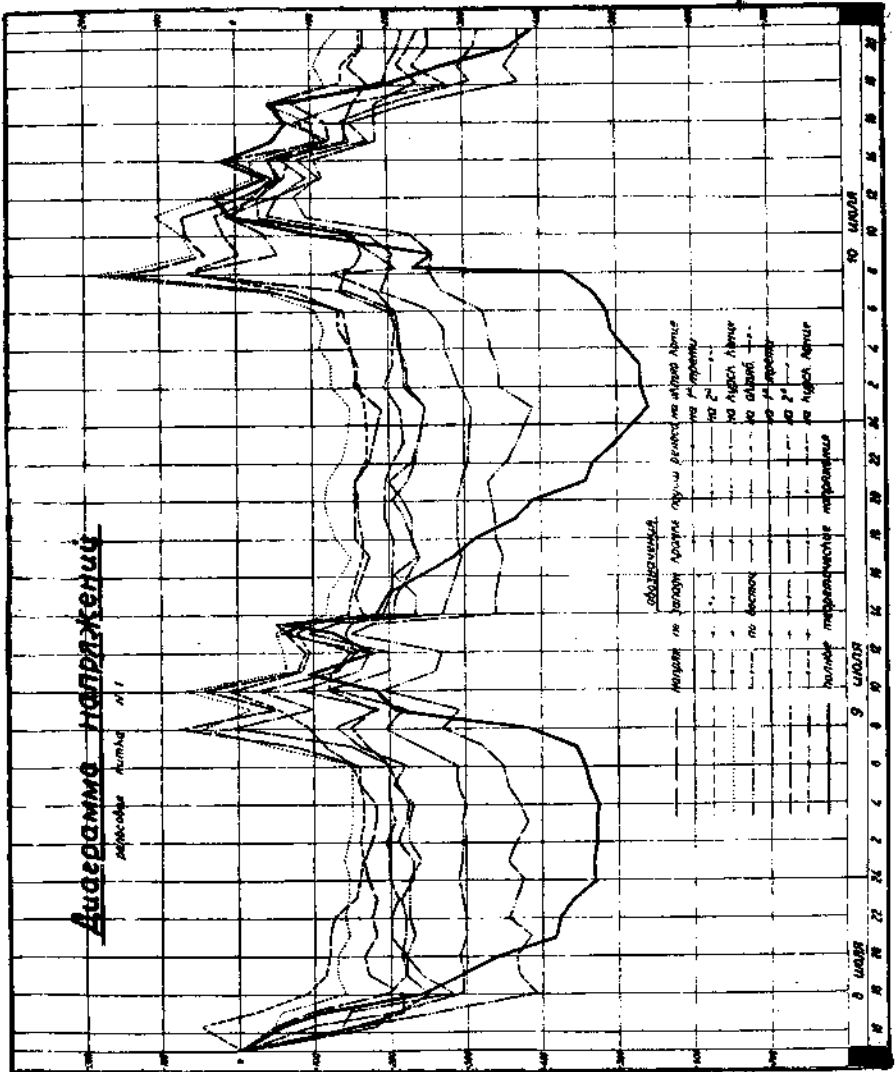
На ст. Конотоп было проведено 6 циклов наблюдений: измерялись напряжения в четырехзвенной сваренной рельсовой плети с затянутыми и затем с освобожденными стыками, то же в трехзвенной плети и тоже в нормальном рельсовом звене длиной 12,5 м. Длины сваренных рельсовых плетей соответственно равнялись  $4 \times 11,0 = 44,0 \text{ м}$  и  $3 \times 11,0 = 33,0 \text{ м}$ . Во всех циклах напряжения в рельсах измерялись экстензометрами Н. С. Веггу, поставленными на рельс в количестве 3-х пар: одна — на середине длины и две — по концам, в пределах первого междушпального ящика от стыка (см. фиг. 5 и 17). В двух последних циклах кроме того были применены экстензометры с коробками Гаккенталя.

Диаграммы температурных напряжений по показаниям экстензометров Н. С. Веггу для перечисленных 6 циклов приведены на фиг. 22—27.



Фиг. 19.

Наиболее характерные диаграммы получены из наблюдений над трехзвенной сваренной плетью со свободными концами (фиг. 24) и с затянутыми стыками. Первая из этих диаграмм показывает, что по концам рельса напряжения все время близки к нулю (измерялись десятными долями деления шкалы экстензометров Н. С. Веггу, цена одного деления которых =  $215 \text{ кг/см}^2$ ), а на середине длины рельса при отклонении температуры рельса от начального ее значения в  $19,0^\circ$  доходили до  $194 \text{ кг/см}^2$  и  $107 \text{ кг/см}^2$ .



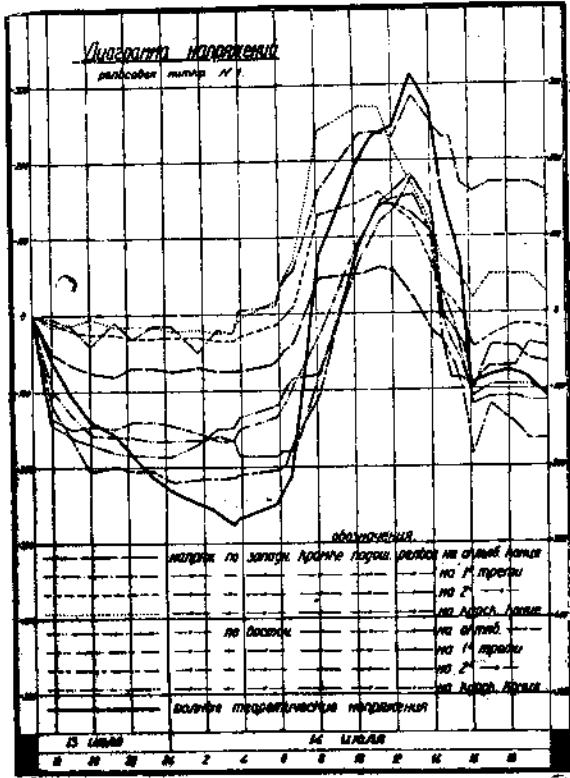
Фиг. 20.

При затянутых стыках напряжения той же рельсовой плети колебались в пределах от  $+301 \text{ кг/см}^2$  до  $408 \text{ кг/см}^2$  при соответствующей амплитуде колебания температуры подошвы рельса в  $25,4^\circ$ . Если принять, что в момент наблюдаемого максимума сжимающих температурных напряжений в  $408 \text{ кг/см}^2$  по всему сечению рельса напряжения имели указанную величину, то можно констатировать, что в период наблюдения полное усилие в рельсе доходило до  $17,5 \text{ т}$ . Приводимые в следующем параграфе данные об удлинении рельса показывают, что после того, как усилие в рельсе достигло указанной величины, произошло смещение одного из его концов в стыке.

Следовательно, эта цифра определяет величину сопротивления трения в стыке в условиях постановки наблюдений. (Стык был затянут рабочим средней силы при помощи ключа длиной 62 см). Цифра эта довольно близко совпадает с приведенными ранее данными непосредственных испытаний стыка на растяжение, если их распространить на случай стыка, затянутого 3-мя парами болтов.

В таблице III приведены наибольшие значения растягивающих (+) и сжимающих (—) напряжений в рельсах при затянутых стыках, а также соответствующие отклонения температуры подошвы рельса от начальных значений.

Измерение напряжений производилось, как указано выше, на пути, закрытом для движения, и, следовательно, не подверженном действию ударов и сотрясений от проходящих поездов. На путях с оживленным движением температурные напряжения в рельсах могут и не доходить до указанных пределов, так как сотрясения рельса облегчают условия скольжения его между стыковыми накладками и по подкладкам. Но с другой стороны в пути могут встретиться и более невыгодные условия состояния пути (чрезмерно затянутые стыки, весьма плотная пришивка костылями, согнанные стыки), чем это было искусственно устроено при постановке наблюдений. Наконец, и колебания температуры рельсов могут быть более резкими и с большей амплитудой, чем это было при производстве наблюдений. Все это говорит о том, что производством непосредственных измерений температурных напряжений в рельсах можно определять лишь их относительные величины и весьма трудно установить предельные значения их, встречающиеся в действительности. С этой стороны большие результаты могут дать лабораторные опыты по определению сопротивления стыков растяжению и систематические наблюдения над величинами стыковых зазоров на отдельных участках пути.



Фиг. 21.

### § 3. Удлинения рельсов.

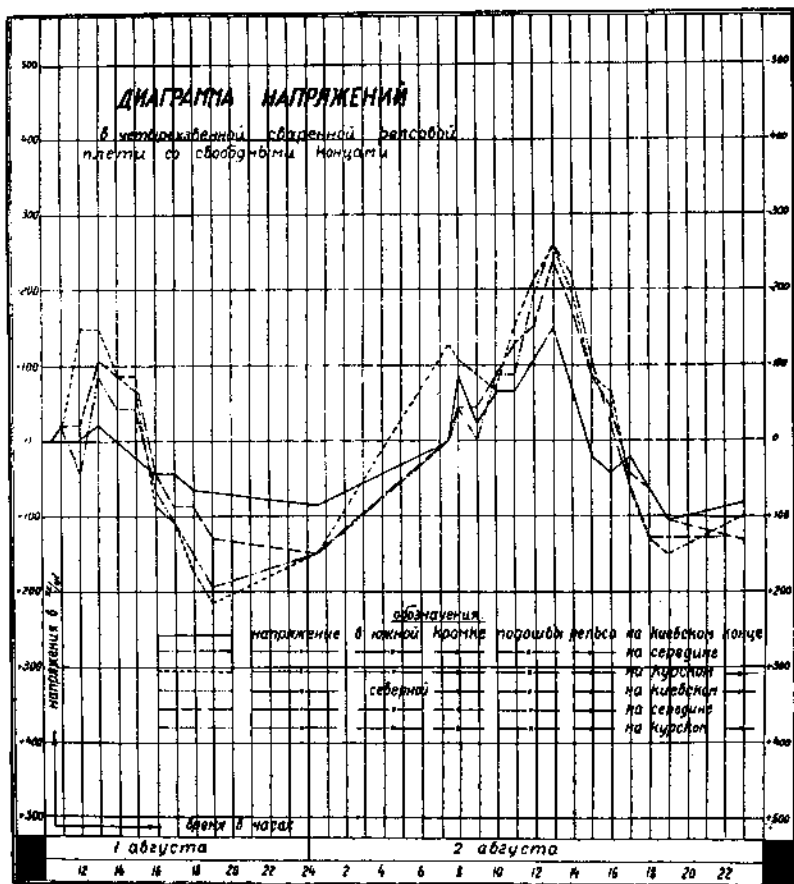
Удлинение рельсовых звеньев, вызывающее изменение величины стыковых зазоров, было третьим фактором, интересовавшим нас при изучении температурного режима рельсового пути. Обозначенное нами ранее через  $\delta$  полное действительное удлинение рельса, определяемое суммой смещений обоих концов его, связано с переменными  $t$  и  $P$  и постоянными  $l$ ,  $\alpha$ ,  $E$  и  $\omega$ , зависящими от геометрических и физических свойств рельса, уравнением (1).

При одновременном измерении всех трех переменных величин  $t$ ,  $P$ , и  $\delta$  — это уравнение дает нам наглядный контроль степени точности и правдоподобности наблюдений.

Определение полных действительных удлинений рельсовых звеньев в Комотопских наблюдениях производилось путем измерения смещений концов этих звеньев. За неимением специально приспособленных для этой цели приборов, по концам рельса были

Таблица III.

НАБЛЮДАЕМЫЙ РЕЛЬС.	Число и месяц.	Напряжения кг/см <sup>2</sup>		Отклонения темпер. от нач. значения.	
		+	-	+	-
Четырехзвенная плеть с затянутыми стыками . . . . .	3-VIII	+ 86	-387	-1,4°	+17,5°
		+107		-0,5°	
Трехзвенная плеть с затянутыми стыками . . . . .	8-VIII	+258	-172	-9,0°	+5,6°
	9-VIII	+194	-215	-6,0°	+6,7°
	10-VIII	+301	-323	-11,1°	+11,5°
	11-VIII	+301	-408	-11,4°	+14,0°
	12-VIII				
12,5-метровое звено с затянутыми стыками . . . . .	26-VIII	+258	-301	-19,6°	+5,4°
	27-VIII	+301	-323	-21,6°	+7,0°

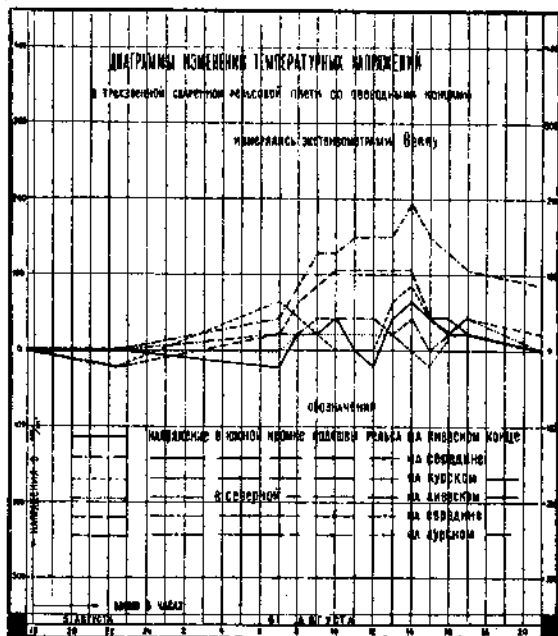


Фиг. 22.



Фиг. 23.

установлены, как показано на фиг. 17 (справа) экстензометры Гейгера. Прикреплены они были к доске, прибитой к двум стыковым шпалам. Костыли, прикреплявшие рельсы к этим шпалам, были ослаблены с целью устранения температурного угона этих шпал вместе с рельсом. К головке рельса против прибора была притянута двумя струбцинками отогнутая скоба, в которую упирался конец шпильки прибора, соединенной с рычажком 2-го рода, служившим указателем величины перемещений и дававшим тройное увеличение. Механизм для записи диаграмм, которым снабжен этот прибор, использованным быть в данном случае не мог ввиду слишком большой скорости движения бу-



Фиг. 24.

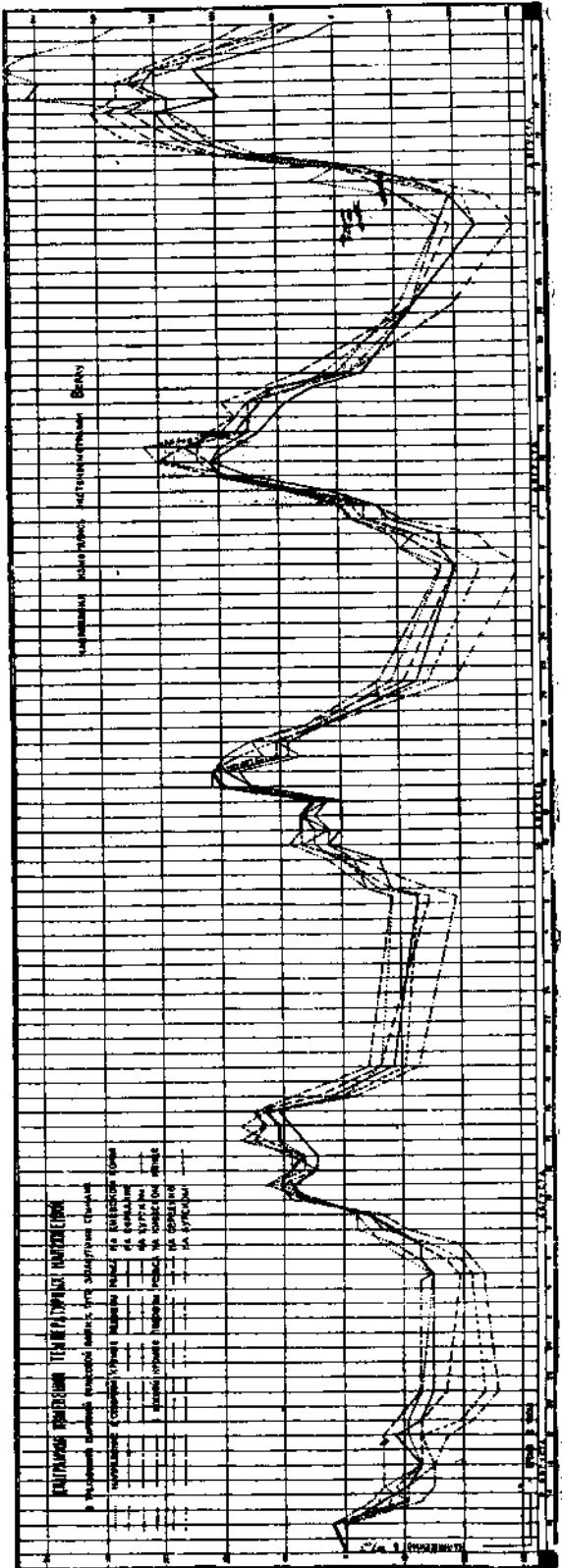
ажной ленты и малой длительности действия завода. Поэтому на столике для записи диаграмм была приспособлена неподвижная шкала, по которой и делались соответствующие отсчеты. В каждом цикле наблюдений таких приборов ставилось два — по обоим концам рельса. Отсчеты по ним делались одновременно с измерением температуры и напряжений.

Несмотря на ослабление костылей на стыковых шпалах в одном из циклов наблюдений все-же был замечен температурный угон этих шпал, вследствие чего соответствующую диаграмму пришлось исключить из рассмотрения.

Между прочим при производстве температурных наблюдений было обнаружено следующее явление: на свободном конце рельсовой нитки, в средней длине которой (и на достаточном расстоянии от концов) находились звенья, подвергнутые наблюдениям, около некоторых шпал были замечены трещины в балласте вдоль боковых граней шпал (фиг. 28). Трещины эти имели клиновидную форму и сходили на нет к противоположной рельсовой нитке, которая оставалась непрерывной по всей своей длине и имела слабо затянутые стыки, перекрытые четырехдырными накладками. Трещины наибольших размеров были замечены возле тех шпал, к которым рельс был прижат костылями наиболее сильно. Около нескольких старых шпал, в которых костыли еще держались, никаких трещин в балласте обнаружено не было. По мере удаления от конца рельса А (фиг. 28) размеры трещин становились меньше и меньше. Все это показывает, что трещины эти появились как следствие температурных перемещений конца рельсовой нитки А. По виду трещин это явление вполне схоже с тем, что принято называть «внезапным угоном шпал» (*Plötzliche Wanderung*).

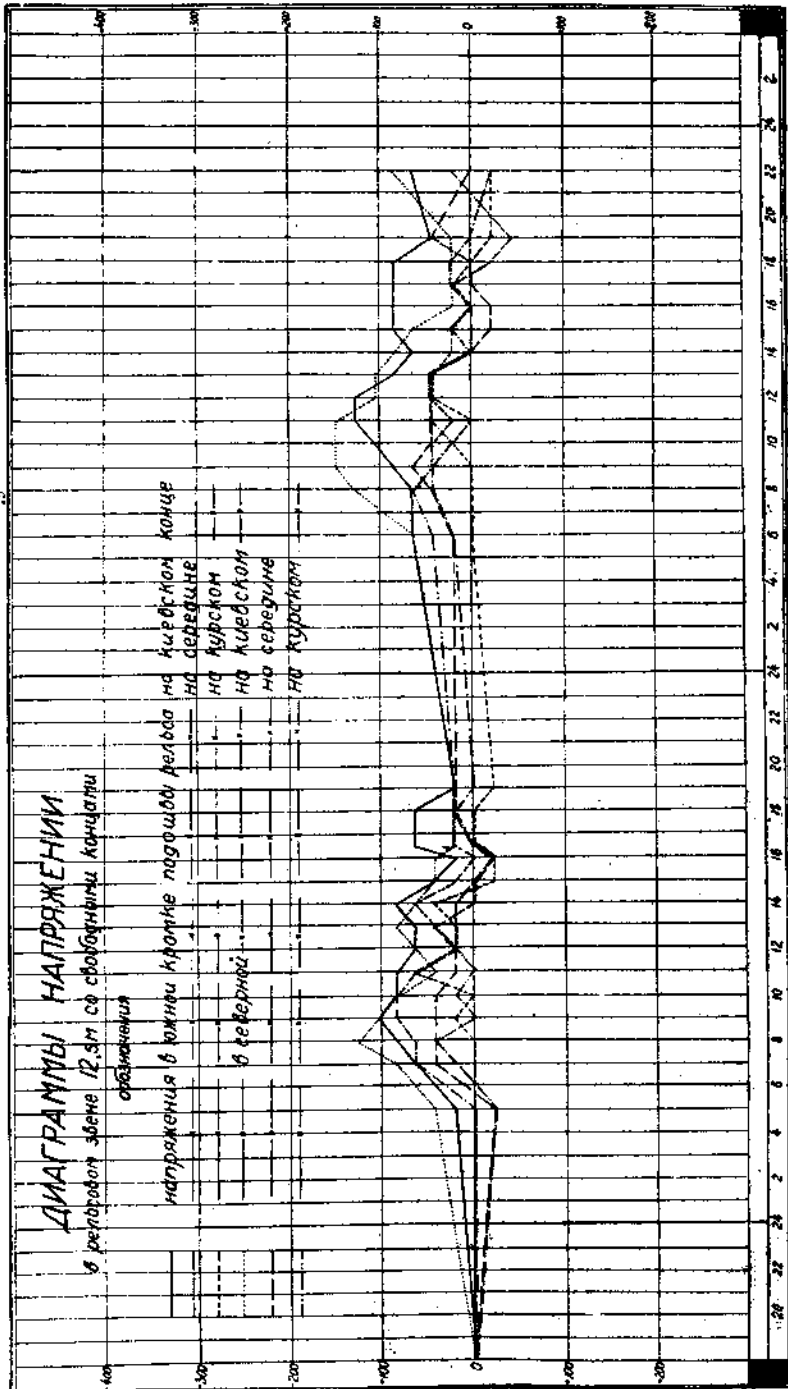
В данном случае этот угон был особенно силен и рельефен ввиду полной свободы конца рельса А.

Внезапный угон шпал на железнодорожных путях, как видим, является следствием колебаний температуры рельсов. То, что это явление происходит внезапно и чаще наблю-



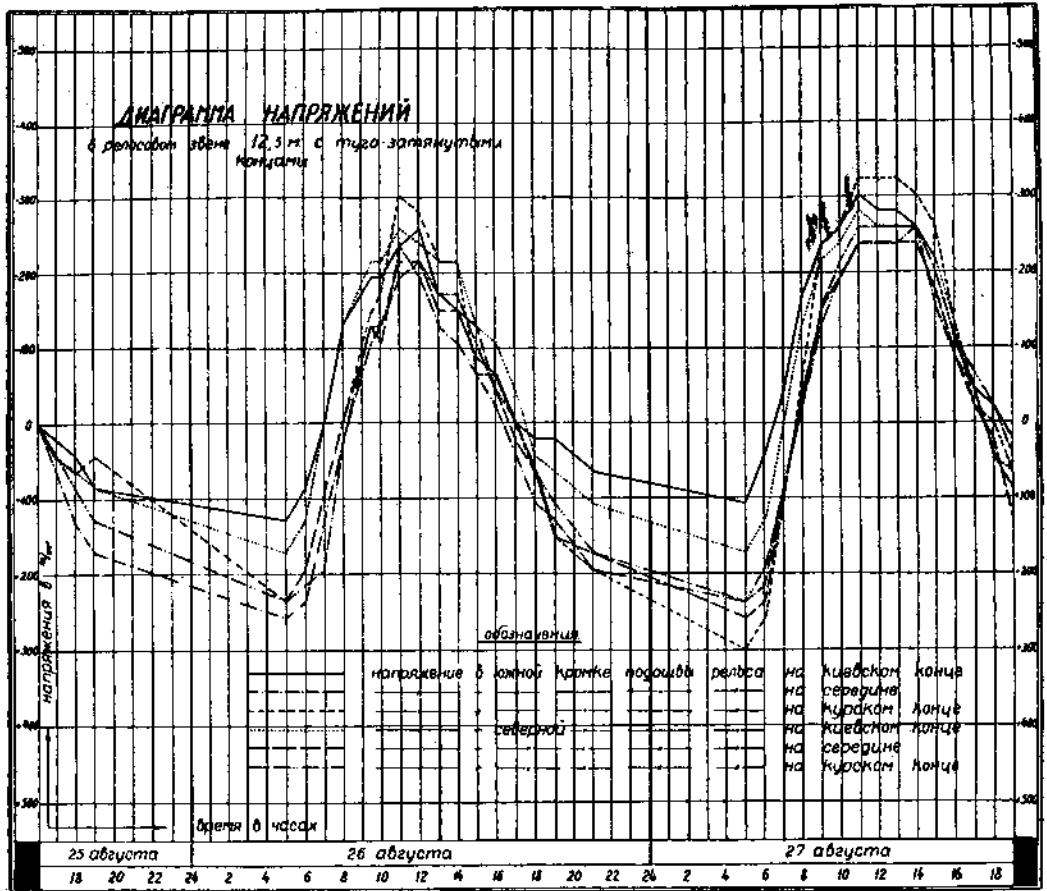
Фиг. 25.

дается после прохода поездов, объясняется внезапными же смещениями концов рельсов в стыках, проявляющимися наиболее легко при сотрясениях рельса от проходящих поездов. Продольный толчок в рельсе, происходящий при его внезапном удлинении



Фиг. 26.





Фиг. 27.



Фиг. 28.

нии, передается скреплениями на шпалу и последняя сдвигается вместе с рельсом вдоль оси пути.

На основании записей по приборам Гейгера составлены диаграммы действительных удлинений рельсовых звеньев для пяти из циклов проведенных в Коостопе наблюдений, а именно: диаграмма удлинений четырехзвенной сваренной плети со свободными концами (фиг. 29), то-же при затянутых стыках (фиг. 30), то-же для трехзвенной плети со свободными концами (фиг. 31) и при затянутых стыках (фиг. 32) и для 12,5 метрового звена при затянутых стыках (фиг. 33). На тех же диаграммах нанесены кривые полных теоретических удлинений рельсов, подсчитанных на основании колебаний средних температур подошвы рельса. Эти кривые являются графическим изображением левой части уравнения (1) в функции от времени. Кроме того на диаграммах

нанесены кривые вероятных полных удлинений рельсов, изображающих правую часть того же уравнения (1) и построенные по схеме, показанной на фиг. 34.

Как видим, ординаты этих кривых представляют собою сумму величин действительного наблюдаемого удлинения  $\delta$  и той части удлинения, которая не смогла проя-

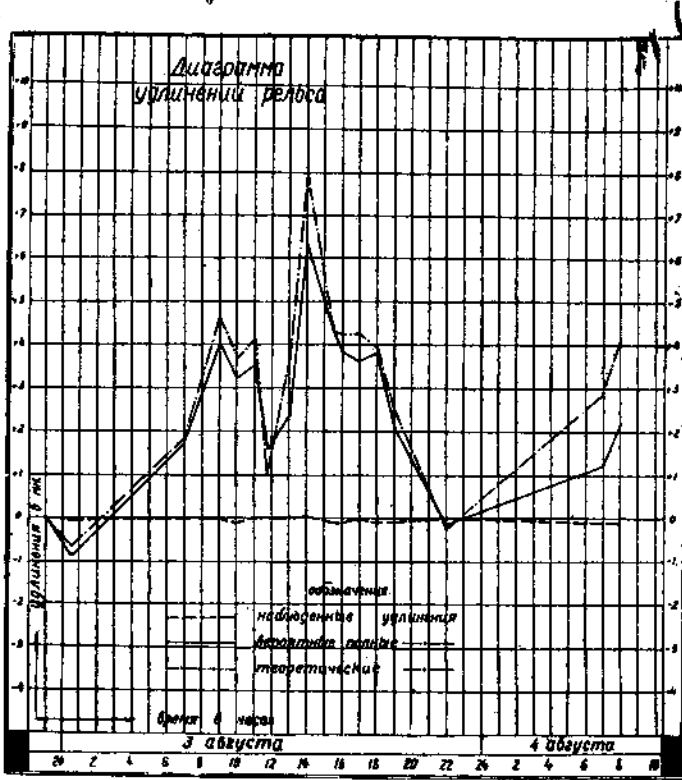


Фиг. 29.

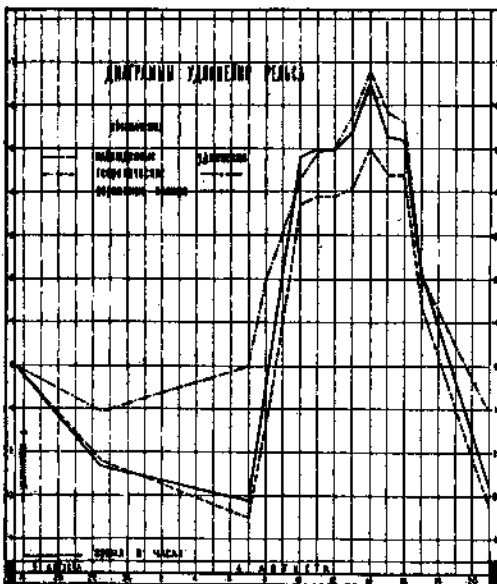
виться вследствие возникновения в рельсе продольных усилий и которая выражается вторым членом правой части уравнения (1). Эти последние удлинения подсчитывались на основании наблюдаемых значений напряжений по концам и на середине длины рельсового звена в предположении, что эпюры напряжений по длине рельса имеют прямо-

линейное очертание между измеренными ординатами (фиг. 35). Тогда, пользуясь обозначениями, приведенными на фиг. 35, мы можем написать:

$$\frac{1}{F\omega} \int_0^l P. dx = \frac{l}{4E} (n_1 + 2n_2 + n_3) \dots \dots \dots (4)$$



Фиг. 30.



Фиг. 31

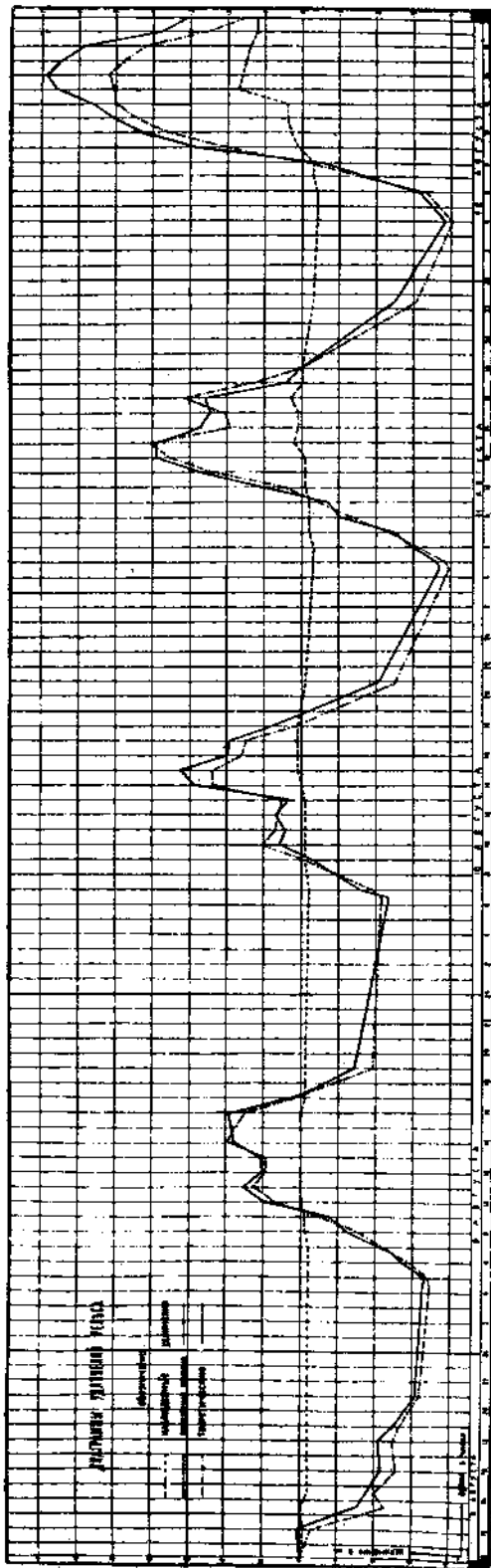
Построенные таким образом кривые вероятных полных удлинений, как видно из диаграмм фиг. 29—33, довольно близко совпадают с теоретическими кривыми полных удлинений рельса. Это указывает на достаточную степень надежности полученных результатов.

Из рассмотрения диаграмм удлинений для случаев, когда стыки были туго затянуты (фиг. 30, 32 и 33), видно, какая небольшая доля полных удлинений рельса проявляется в действительности. Кривая наблюдаемых удлинений, особенно, для первых двух из указанных случаев, когда стыки были затянуты особенного, все время идет по значениям, близким к нулю. На диаграмме удлинений трехзвенной сваренной плиты с затянутыми

стыками в конце ее есть характерный скачок (12-го августа в 12 ч.), соответствующий внезапному удлинению рельса. Этот момент наблюдений соответствует описанному в предыдущем параграфе случаю смещения рельса в стыке при продольном усилии, близком к 17,5 т. Толчок в рельсе при этом был настолько силен, что некоторые из экстензометров оказались сбитыми и стали давать ложные показания. Этим объясняется сильное отклонение кривой вероятных полных удлинений от теоретической кривой во время, последующее за указанным толчком.

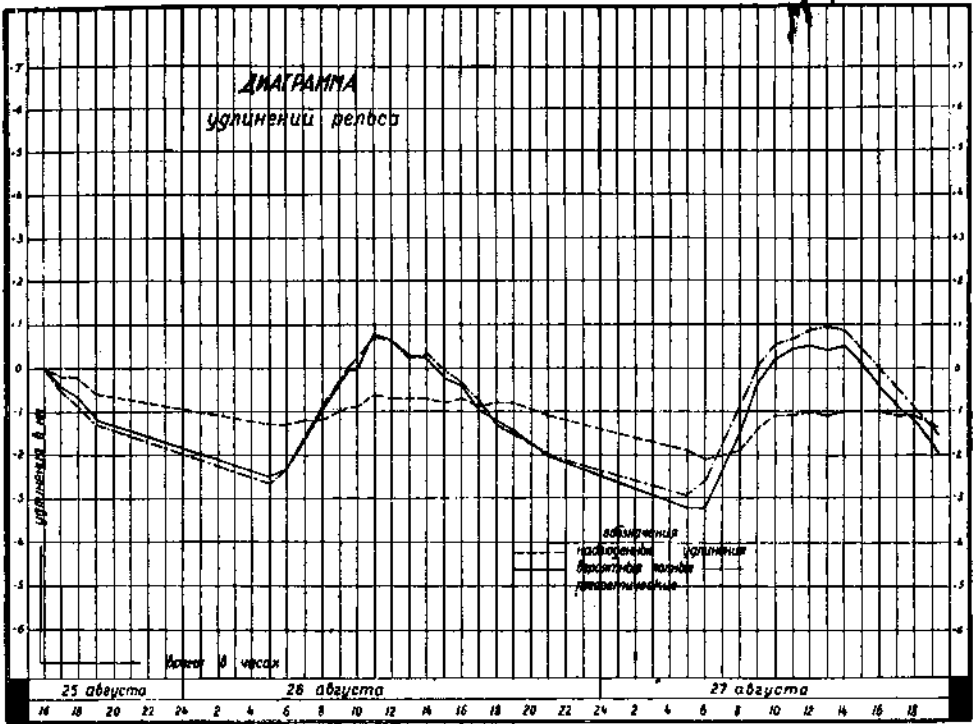
Диаграммы удлинений рельсов, свободных по концам, дают иное соотношение действительных и вероятных полных удлинений (фиг. 29 и 31): в этих случаях кривая действительных удлинений проходит близко от кривой теоретических удлинений, так что лишь небольшая доля полных вероятных удлинений идет за счет возникающих в рельсе температурных напряжений, имеющих в этом случае сравнительно небольшую величину.

Опыт Конотожских температурных наблюдений позволяет сделать в отношении методики этих наблюдений заключение, что в виду близкого совпадения теоретической и экспериментальной (вероятной) кривых полных температурных удлинений измерение всех трех факторов —  $t$ ,  $P$  и  $\delta$  — не является обязательным. При массовых наблюдениях по изучению температурного режима рельсового пути, каковые интересно было бы поставить на дорогах, достаточно было бы ограничиться измерением температуры рельсов и соответствующих удлинений их, а измерение напряжений, требующее специального оборудования экстензометрами, откинуть с тем, чтобы судить о величине напряжений в рельсах по получаемым диаграммам теоретических и действительных удлинений рельсов. Непосредственно же экспериментальное определение температурных напряжений следует производить лишь в наиболее интересных случаях (напр., при весьма сильных суточных колебаниях температуры). При производстве упрощенных температурных наблюдений без измерения напряжений должно обращать особое внимание на дости-



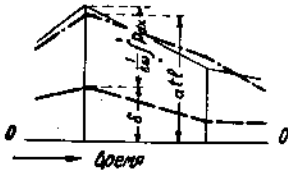
Фиг. 32.

жение полной неподвижности приборов, измеряющих смещения концов рельсов. Самые приборы эти могут быть сконструированы весьма просто, ибо требуют лишь самого незначительного увеличения измеряемых перемещений и легко могут быть изготовлены на дорогах. К ним может быть приспособлен и записывающий механизм, для чего можно использовать дающий 2 оборота в сутки часовой механизм простых будильников.

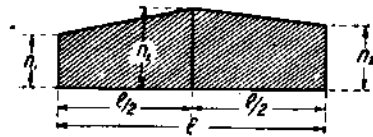


Фиг. 33 .

Измерения удлинений рельсовых звеньев, ввиду необходимости установки по концам каждого звена специальных приборов, может производиться лишь над отдельными звеньями или над ограниченным числом их. Метод наблюдения может быть еще упрощен в целях получения данных, касающихся не отдельно выхваченных для наблюдений



Фиг. 34.



Фиг. 35.

рельсовых звеньев, а целых участков пути, именно, по концам выделенного под наблюдение участка пути должны быть установлены приборы для измерения смещений концов рельсов, описанные выше. Измерение же смещений рельсовых концов в промежуточных стыках этого участка пути может быть заменено наблюдением над изменением стыковых зазоров. Полученные таким путем данные, сторго говоря, не определяют условий температурной работы отдельных звеньев, так как изменение стыковых зазоров не дает еще возможности получить удлинение каждого звена. Но подобные наблюдения ин-

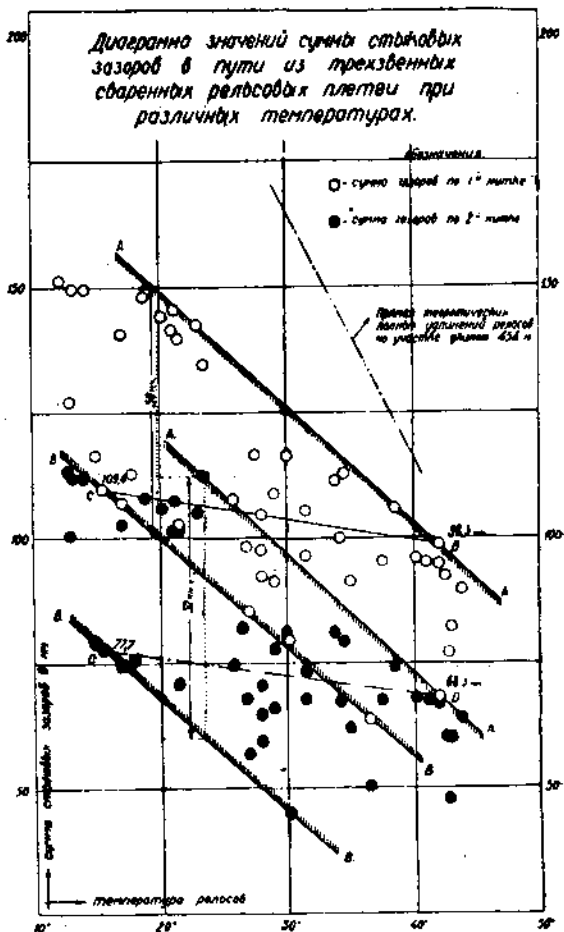
тересны с точки зрения характеристики средних условий температурной работы целых участков пути, а также определяют степень неравномерности распределения продольных температурных напряжений на протяжении достаточно длинных участков пути.

Наблюдения над изменениями стыковых зазоров были поставлены Путевым Испытательным Бюро на ст. Конотоп над четырьмя рельсовыми нитками двух главных путей в пределах, где дорогой уложены в виде опыта сваренные рельсовые плети. Измерение зазоров производилось клинообразным прозором (см. фиг. 17, по середине), дающим показания с точностью до 0,1 мм. На одном из этих путей уложены трехзвенные рельсовые плети в количестве 13 шт.

на каждой рельсовой нитке, общим протяжением 429 м, а на другом — четырехзвенные плети в количестве 9 шт., общим протяжением 396 м. Один из концов каждого из путей был отделен 12,5-метровым рельсовым звеном от выходной стрелки, уложенной на щебеночном балласте, а другой примыкал к пути из нормальных 12,5-метровых рельсовых звеньев, первое из которых было также уложено на щебне, что было сделано в целях уменьшения угона. Прибор для измерения смещений концов крайних рельсовых звеньев поставлено не было. Наблюдения производились над изменением зазоров во всех промежуточных стыках участка со сваренными рельсами, а также в первых стыках между рельсами нормальной длины по обоим концам участка. Таким образом общая длина каждого из путей в пределах, где производились наблюдения, была соответственно  $l_1 = 429 + 2.12,5 = 454$  м и  $l_2 = 396 + 2.12,5 = 421$  м. Измерение зазоров производилось за период с 29-го июля по 27-ое августа, причем первое время наблюдения эти велись не регулярно по времени, но при различных значениях температуры рельсов, а под конец был произведен ряд частых промеров величин зазоров (в количестве 12-ти за одни сутки), что дало непрерывную картину суточных изменений величины зазоров.

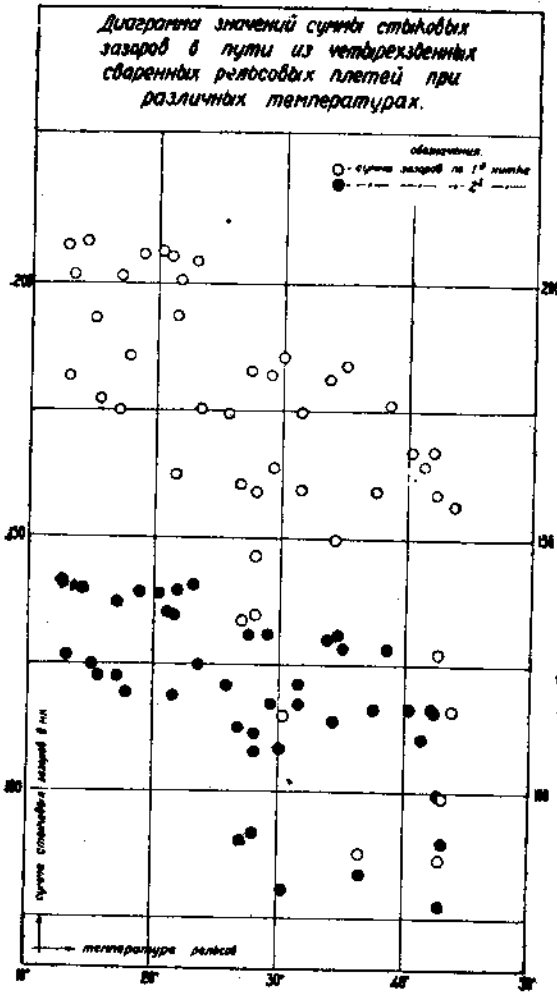
В отношении характеристики средних условий работы участка пути при изменяющейся температуре рельсов интересно изменение суммы стыковых зазоров на этом участке в функции от температуры. Значение этой суммы для 4-х подвергнутых наблюдению рельсовых ниток по данным из 45 произведенных измерений при различных значениях температуры рельсов нанесены на диаграммы фиг. 36 и 37. Суточные же колебания сумм зазоров представлены на диаграмме фиг. 38.

Из рассмотрения диаграмм фиг. 36 и 37 видно, что при одних и тех же значениях температуры сумма стыковых зазоров имеет самые разнообразные значения. Объясняется это тем, что в зависимости от предшествующего состояния рельса (предшествовавших



Фиг. 36.

температуры его, сжатиями и т. п.) и от изменений в состоянии скреплений (подбивки колесных, подвижных стыковых болтов) в различных случаях рельс напрягается по разному и таким образом не всегда одна и та же доля полных удлинений рельса проявляется в действительности. В общем полученные измеренные цифры даны на диаграммах точки, сгруппированные для каждой рельсовой нитки в пределах между двумя отгибающимися прямыми: для 1-й нитки—между прямыми А—А и В—В, а для 2-й—между прямыми А<sub>1</sub>—А<sub>1</sub> и В<sub>1</sub>—В<sub>1</sub> (фиг. 36). Ограниченная этими отгибающимися часть площади диаграммы



Фиг. 37.

определяет графически те пределы, в которых могут варьироваться соотношения между температурой и суммой стыковых зазоров в данной рельсовой нитке. На тех же диаграммах нанесены теоретические прямые полных свободных удлинений соответствующих рельсовых ниток. Местоположение этих прямых на диаграммах, учитывающих величину суммы стыковых зазоров в рассматриваемой рельсовой нитке, взято произвольным. Характерным является угол наклона этих прямых, определяющий величину удлинения рельсов (и соответствующего изменения суммы стыковых зазоров) при изменении температуры на 1 градус. Как видно из диаграмм, угол наклона этой теоретической прямой больше угла наклона отгибающихся, что указывает на отставание по величине действительных удлинений рельсовых звеньев от полных теоретических, происходящее за счет появления в рельсах продольных температурных усилий.

Средние для всей длины рельсовой нитки значения напряжений, вызываемых этими усилиями, могут быть приблизительно определены из приведенных диаграмм. В самом деле, промеряв на них разность ординат отгибающихся прямых при одном и том же значении температуры, мы можем судить по величине этой разности о том, какая доля

удлинений рельсов идет за счет возникновения в них напряжений. Отгибающиеся прямые, как видно из диаграммы, идут параллельно одна другой. Следовательно, при любом значении температуры пределы изменения температурных напряжений примерно одинаковы. При наиболее низких (за период наблюдений) значениях температуры рельсов, в них, нужно думать, могли существовать только растягивающие напряжения, а при наиболее высоких температурах — только сжимающие напряжения. Если принять, что для этих двух случаев одна из отгибающихся соответствует ненапряженному состоянию рельса, то другая отгибающаяся будет определять предельные значения среднего напряжения на всей длине рельсовой нитки. Среднее значение разности ординат отгибающихся на диаграмме фиг. 36, относящейся к пути из трехзвенных сваренных рельсовых плетей, составляет  $\delta_1 =$

= 50 мм для 1-й рельсовой нитки и  $\delta_2 = 52$  мм — для второй. Соответственно величины средних напряжений при полной длине каждой рельсовой нитки  $l_1 = 429 + 2.12,5 = 454$  м будут:

$$\pm n_1 = \frac{\delta_1 \cdot E}{l_1} = \frac{5,0 \cdot 2150000}{45400} = 237 \text{ кг/см}^2,$$

$$\pm n_2 = \frac{\delta_2 \cdot E}{l_1} = \frac{5,2 \cdot 2150000}{45400} = 246 \text{ кг/см}^2.$$

Предельные вероятные значения средних напряжений могут быть найдены из приведенных диаграмм и иным путем, а именно из рассмотрения невыгоднейших условий перехода от наимисших к наивысшим температурам. Рассмотрим для каждой рельсовой нитки, к которым относится диаграмма фиг. 36, два состояния, определяемые соответственно точками С и D для первой нитки и  $C_1$  и  $D_1$  — для второй. Состояния, определяемые, точками С и  $C_1$  соответствуют случаям, когда при одной из самых низких наблюдаемых температур сумма зазоров имела наименьшие значения (что соответствует расположению этих точек на нижних огибающих), а состояния, определяемые точками D и  $D_1$ , соответствуют наибольшему значению суммы зазоров (т.е. расположению этих точек на верхних огибающих) при одном из наивысших наблюдаемых значений температуры. Состояниям С и  $C_1$ , соответствуют, очевидно, растягивающие напряжения в рельсах, а состояниям D и  $D_1$  — сжимающие напряжения. Если принять, что абсолютные величины растягивающих и сжимающих напряжений, соответствующих этим двум состояниям, были равны, то среднее напряжение (положительное или отрицательное) может быть найдено, как половина от полного изменения напряжений при переходе из состояний С и  $C_1$  в состояния D и  $D_1$ , следовательно, при изменении температуры в обоих случаях на  $42,0^\circ - 15,5^\circ = 26,5^\circ$  и при соответственных изменениях сумм зазоров для 1-й нитки  $\delta_1 = 109,6 - 98,5 = 11,1$  мм, а для второй —  $\delta_2 = 77,7 - 68,3 = 9,4$  мм будем иметь:

для первой рельсовой нитки:

$$\pm n_1 = \frac{(\alpha l_1 - \delta_1) E}{2l_1} = \frac{(0,0000108 \cdot 26,5 \cdot 45400 - 1,11) \cdot 2150000}{2 \cdot 45400} = 282 \text{ кг/см}^2;$$

для второй рельсовой нитки:

$$\pm n_2 = \frac{(\alpha l_2 - \delta_2) \cdot E}{2l_1} = \frac{(0,0000108 \cdot 26,5 \cdot 45400 - 0,94) \cdot 2150000}{2 \cdot 45400} = 286 \text{ кг/см}^2.$$

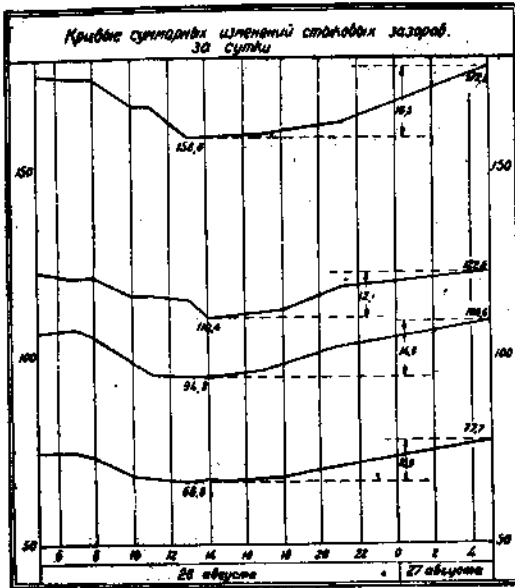
Как видим, оба метода подсчета предельных средних значений напряжений в рельсовых нитках дают близко сходящиеся результаты. Подсчет по данным диаграммы суточных колебаний суммы зазоров (фиг. 38) приводит к тем же примерно значениям средних напряжений.

Для характеристики степени неравномерности распределения действительных удлинений отдельных звеньев рельсовой нитки по ее длине построены диаграммы фиг. 39 — 42, охватывающие 6 измерений за те сутки, к которым относится диаграмма фиг. 38.

Эти диаграммы показывают, что большое число стыков оставалось почти без всякого изменения в величине зазоров при суточном колебании температуры в пределах  $26,5^\circ$ . Записи наблюдений в течении месяца, на диаграммах не приведенные, показывают что и за все время наблюдений при полном колебании температуры рельсов в пределах  $t = 52,3^\circ - 12,0^\circ = 40,3^\circ$ , размеры зазоров в этих стыках колебались в пределах десятых долей мм. Такие стыки встречались в каждой из подвергнутых наблюдению рельсовых ниток по несколько подряд (напр. для 1-й нитки пути с трехзвенными сваренными плетями (фиг. 39) все стыки №№ 10 — 15 при общем расстоянии между крайними стыками в  $33,04 + 12,5 = 45,5$  м). В пределах середины длины таких



участков с постоянными по величине стыковыми зазорами рельсы, очевидно, за все время наблюдений вовсе не удлинялись. Если принять, что ненапряженному состоянию рельсов соответствовало среднее значение температуры в указанных пределах, то по абсолютной величине значения температурных напряжений в этих участках рельсов достигали:

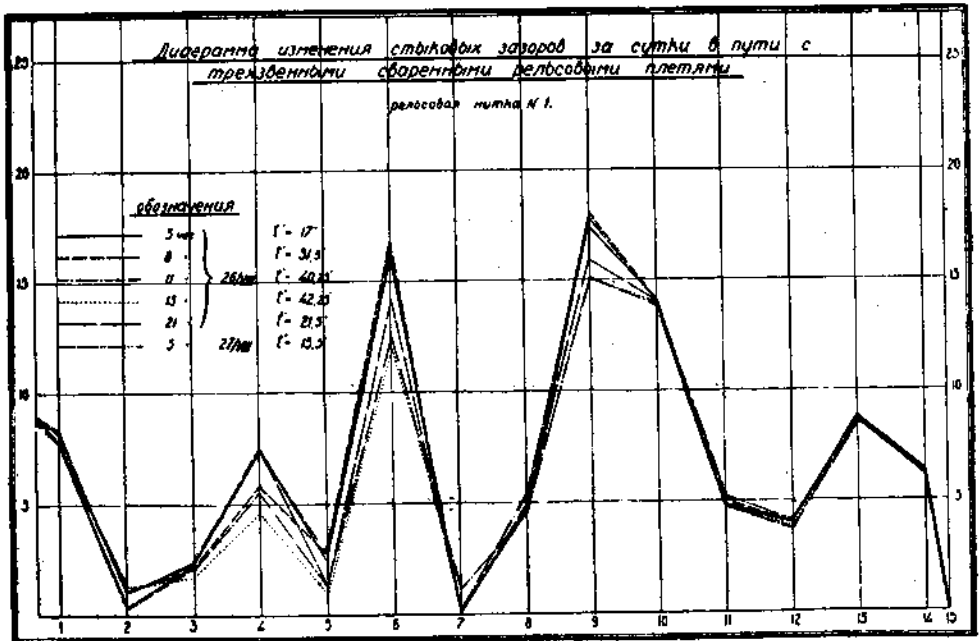


Фиг. 38.

$$\pm n = \frac{\alpha t E}{2} = \frac{0,0000108 \cdot 40,3 \cdot 2,15 \cdot 10^6}{2} = 467 \text{ кг/см}^2.$$

Такого значения напряжения на отдельных участках рельсов во всяком случае достигали, ибо подсчитаны они в наивыгоднейшем предположении о температуре, соответствующей не напряженному состоянию. Можно думать, что в действительности значение этой температуры было ниже, чем среднее из пределов колебаний ее за месяц наблюдений,

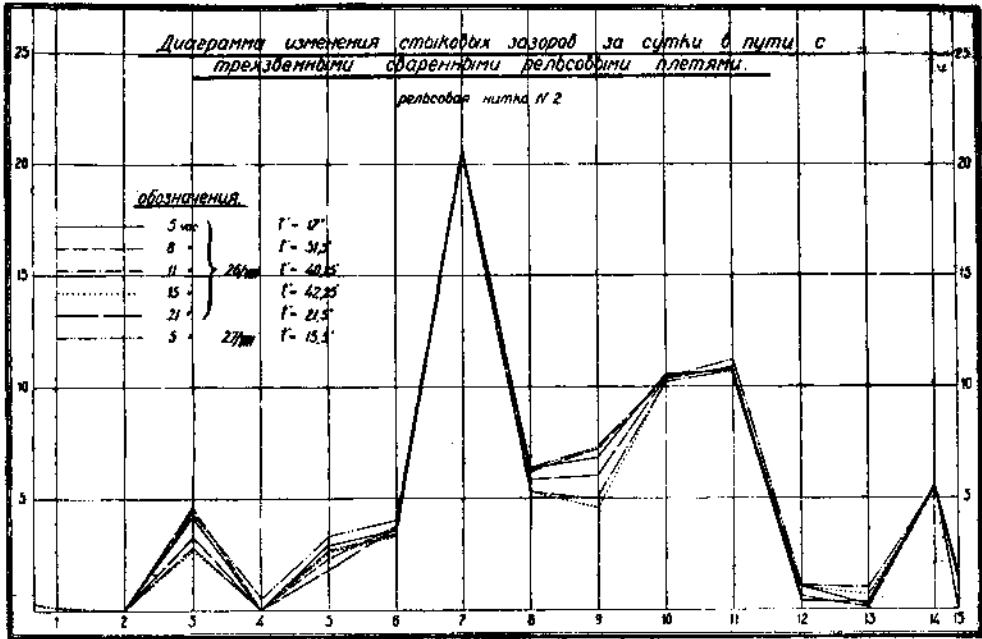
т.е. ниже, чем  $\frac{52,3 + 12,0}{2} = 32,0^\circ$ , так как температуры, близкие к  $52,3^\circ$ , наблюдались редко, тогда как ночные минимумы температуры рельсов были более по-



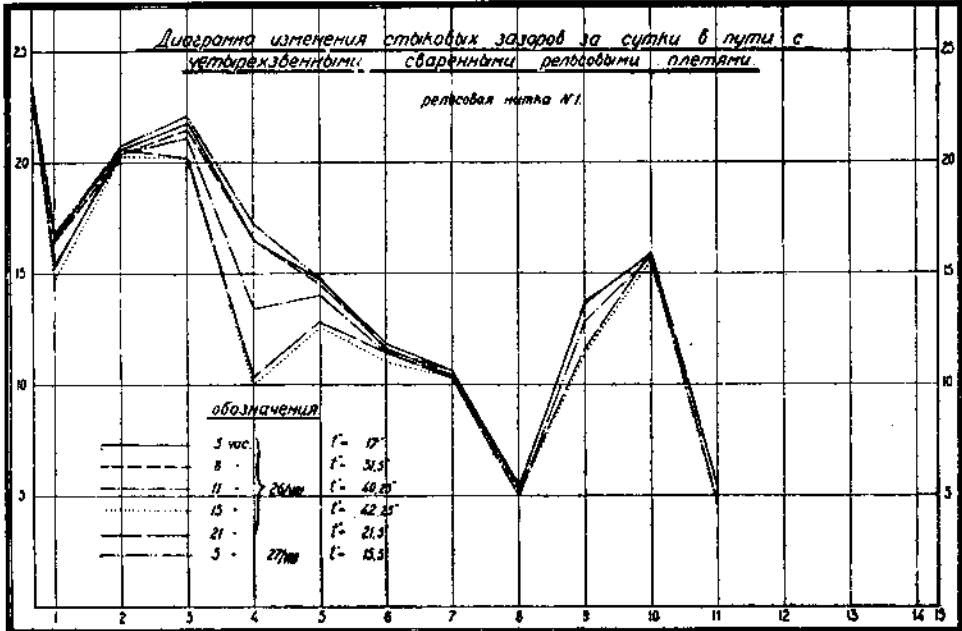
Фиг. 39.

стоянны (см. фиг. 7—14). А если так, то сжимающие температурные напряжения в рельсах в отдельные моменты были еще выше ранее подсчитанных.

Изложенные данные наблюдений над температурой, напряжениями и удлинениями рельсов позволяют сделать общее заключение, что при современной нам конструк-



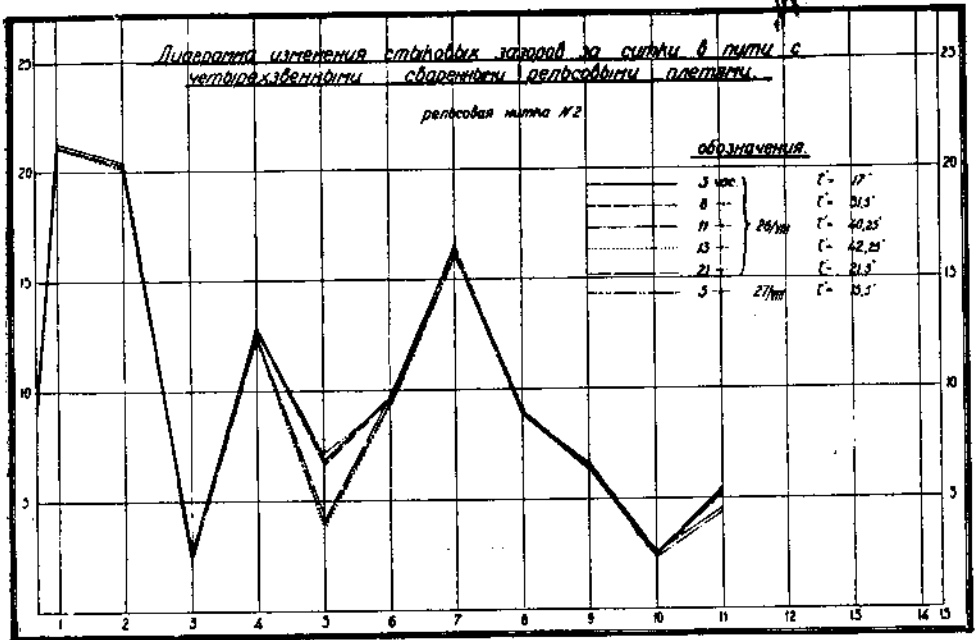
Фиг. 40.



Фиг. 41.

ции верхнего путевого строения в рельсах могут возникать под влиянием колебаний температуры продольные сжимающие или растягивающие напряжения, достигающие в отдельных случаях  $500 \text{ кг/см}^2$ , а иногда, может быть, и более высоких значений. На-

изгибания такой величины могут появляться в пути, находящемся в нормальных условиях содержания, и являются следствием главным образом несовершенства стыка современного нам типа. Рельсовый стык, являясь большим местом железнодорожного хозяйства как в отношении содержания пути, так и со стороны воздействия на подвижной состав, далеко не является при современной его конструкции безупречным в отношении температурного режима рельсового пути. Если требование придания стыку достаточной жесткости и устойчивости в отношении воздействия динамической вертикальной на-



Фиг. 42.

грузки и уменьшения угона рельсов делает неизбежным создание в стыковом соединении сопротивления продольным смещениям концов рельсовых звеньев, то при определении расчетных напряжений в рельсах нельзя не считаться с воздействием температуры. Если возникновение температурных напряжений в рельсах является неизбежным следствием конструкции стыков, то вполне логическим представляется переход к сварке рельсов в длинные плети с устройством стыков (в современном смысле этого слова) на больших расстояниях друг от друга для компенсации лишь действительно проявляющихся температурных удлинений рельсов. Вопрос о длине сваренных плетей, о величине зазоров в оставляемых несваренными стыках и о принципах конструирования этих последних находится в тесной связи с вопросом об устойчивости пути, к изложению которого мы и переходим.

#### § 4. Устойчивость рельсового пути.

В железнодорожной практике неоднократно наблюдались случаи выпучивания пути в сторону под действием температурных сжимающих напряжений. В качестве примера, описанного в технической литературе \*), приводим случай выпучивания пути, происшедшего на швейцарской линии между Haldenstein и Chur 9-го августа 1925 г. (фиг. 43). Выпучивание обнаружилось на прямой, длиной в 1650 м на протяжении 130 м пути. Уже в 1905 г. было замечено, что уложенные на этом пути рельсы (тяжелого типа № 1. S. V.B.) на деревянных шпалах имели незначительные стыковые зазоры вследствие некоторого угона пути. С тех пор прошло несколько весьма жарких лет вполне

\*) Schweizerische Bauzeitung, 1926 г., № 16.

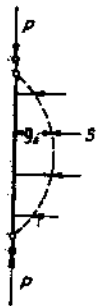
благополучно. Выпучивание произошло во время ремонтных работ по смене шпал, удалявшихся одновременно в среднем по две на звено. В описании указывается, что температура на солнце (очевидно, по измерению открытым воздушным термометром) переходила за  $50^{\circ}\text{C}$ . Выпучивание произошло, как видно из фотографии, по S-образной кривой со стрелкой в  $\frac{1}{3}$  ширины пути. Предполагается, что путь выбросило в сторону под одним из проходивших поездов или непосредственно после его прохода. Следующий поезд, который не мог быть совершенно остановлен перед выпучившимся местом, частично сошел с рельсов.

Из этого описания видно, насколько серьезные последствия могут быть вызваны появлением в рельсах чрезмерно больших сжимающих напряжений. В то же время грань, за которой эти напряжения становятся небезопасными не только в отношении прочности рельсов, но и со стороны устойчивости пути, до сих пор ни теоретическими, ни экспериментальными исследованиями еще не изучена.

Как схему для теоретического изучения этого явления, мне кажется, правильно рассматривать рельс, как брус, подверженный действию продольных сжимающих усилий и находящийся в среде из сосредоточенных упругих сопротивлений, препятствующих его поперечному искривлению (фиг. 44). В самом деле, в первый момент выпучивания рельс изгибается за счет отжатия костылей, представляющего из себя до известных пределов упругое явление. Приводимые ниже диаграммы отжатия костылей (фиг. 46—50) схожи с кривыми разрушения образцов различных упругих материалов и показывают, что



Фиг. 43.



Фиг. 44.

до некоторого значения отжимающего усилия, соответствующего как бы пределу пропорциональности, деформация отжатия подчиняется закону Гука. Если в начальный момент выпучивания рельс искривился за счет упругого отжатия костылей, то после достижения отжимающего усилия на какой-либо из шпал до значения, соответствующего сопротивлению этой шпалы боковому перемещению ее в балласте, явление переходит во вторую фазу: отжатие костыля на этой шпале далее не сможет продолжаться, ибо действующее на костыль усилие заставит шпалу сместиться поперек пути. Явление из стадии продольного изгиба стержня в среде из сосредоточенных упругих сопротивлений перейдет в такую форму, которая соответствует началу разрушения этой упругой среды. После начала перемещения шпалы усилие, препятствующее искривлению рельса, перестанет возрастать пропорционально боковому отклонению рельса, деформация начнет расти без дальнейшего увеличения упругих сопротивлений продольному изгибу, вследствие чего последующее развитие явления пойдет бурным темпом — путь почти мгновенно выбрасывается в сторону. Форма кривой, по которой изогнется рельс после выпучивания, находится в зависимости от состояния отдельных шпал к моменту

начала выпучивания и от направления действующих на костыли отжимающих усилий в первой фазе явления. Само собою разумеется, явление выбрасывания пути начнется на наиболее слабо сидящей в балласте шпале. Последняя после начала своего перемещения увлекает за собой соседние шпалы, причем направление усилий действующих на эти шпалы, может мгновенно измениться на противоположное. Анализ явления продольного изгиба рельсов в среде упругих сопротивлений показывает, что в начальной стадии явления длина полуволны кривой, по которой изгибается рельс, подучается сравнительно небольшой. Во второй фазе явления, когда перемещена одна из шпал уже началось, рельсу, очевидно, будет легче принять более плавное очертание (с большей длиной полуволны), так как дальнейший рост упругих сопротивлений прекратится и явление приблизится к простому продольному изгибу гибкого стержня. Этим и объясняется возможность перемены знака усилий на некоторых из шпал. Таким образом окончательная форма кривой выпучивания пути, явившаяся как результат второй стадии явления, еще ничего не говорит о форме кривой, по которой изгибается каждый отдельный рельс в первой стадии явления.

Для того, чтобы явление выпучивания пути началось, достаточно, чтобы сжимающее усилие в одной из рельсовых ниток достигло критического значения. Одновременное достижение усилий в обеих рельсовых нитках критического значения весьма мало вероятно. Стимулом для начала первой фазы явления, нужно думать, является продольный изгиб одной из рельсовых ниток, более напряженной. Наличие в другой нитке сжимающего усилия лишь облегчает условия протекания 2-й фазы явления.

С точки зрения установления условий устойчивости пути нас интересует величина критического усилия, соответствующего данному случаю продольного изгиба. Величина этого усилия зависит от условий протекания первой фазы описанного явления и может быть определена на основании данных, характеризующих упругость сопротивления костылей отжатию. Величина сопротивления шпал боковому смещению на значении критического усилия сказаться не может и имеет интерес лишь со стороны качественной характеристики второй стадии явления.

Величина критического усилия для прямого стержня \*) (фиг. 44) подверженного действию сжимающих усилий  $P$ , приложенных к его концам и удерживаемого от искривления потеречными упругими сопротивлениями

$$S = k y_0 \dots \dots \dots (5)$$

пропорциональными ординатам  $y_0$  отклонения оси бруса в точках приложения этих сопротивлений, может быть найдена из условия, что изменение энергии системы при каком-либо из возможных отклонений оси бруса обращается в нуль. Если  $T_0$  есть работа внешней активной нагрузки при отклонении стержня от прямолинейной формы равновесия, а  $T_1$  — изменение внутренней энергии системы при том же отклонении, то величина критического усилия определится из уравнения:

$$T_0 = T_1 \dots \dots \dots (6)$$

Работа  $T_0$  внешней нагрузки, состоящей из двух противоположных сжимающих усилий  $P$ , происходит на перемещениях этих усилий вследствие сближения концов стержня при искривлении. Сжимающие усилия, возникающие вследствие повышения температуры в стержне, местоположение концов которого фиксируется какими-либо препятствиями (например, в виде недеформирующейся станины, как показано на фиг. 45), обладают той особенностью, что после деформации от продольного изгиба стержня эти усилия, вследствие наложенных на них геометрических связей, не смогут перемещаться вслед за концами деформирующегося стержня, вследствие чего искривление последнего в этом случае возможно лишь за счет падения величины сжимающих усилий, связан-

\*) Случай выпучивания пути в кривых мною здесь не рассмотрен. Нужно думать, что при больших значениях радиусов закруглений, встречающихся в пути, влияние кривизны бруса на величину критического усилия будет несущественно.

ного с увеличением длины оси стержня после искривления. \*) В условиях исследуемого нами случая явление, однако, будет протекать иначе, чем для схемы, показанной на фиг. 45. В самом деле, выучивание пути происходит обычно на участке ограниченной длины, по обеим сторонам которого путь сохраняет свое начальное очертание. Сечения рельсов, ограничивающие искривляющийся участок пути, после начала выучивания должны переместиться во внутрь этого участка под давлением реакций от сжимающих усилий в рельсах в пределах боковых, не подвергающихся выпучиванию участков пути. Поэтому при составлении выражения работы  $T_e$  внешних сил мы будем предполагать, что сжимающие усилия, приложенные к концам рельсов в пределах искривляющегося участка, после начала выпучивания сохраняют свою величину и следуют за концами искривляющихся рельсов. Полученные таким образом значения критических усилий будут несколько преуменьшены против действительных, что соответствует увеличению запаса устойчивости.



Фиг. 45.

Из всех возможных искривлений стержня (фиг. 44) нужно выбрать то, при котором уравнение (6) дает наименьшее значение сжимающих усилий. Зададимся условием, что отклонение нашего стержня происходит по синусоидальной кривой с одной полуволной. В дальнейшем определим ту длину стержня, при которой критическое усилие, соответствующее этому условию, получается наименьшим. Уравнение искривленной оси стержня будет иметь вид:

$$y = a \cdot \sin \frac{\pi \cdot x}{l} \dots \dots \dots (7)$$

где  $l$  есть длина стержня,  $a$  — отклонение оси его при  $x = \frac{l}{2}$ .

Уравнение (6) в раскрытой форме представится таким образом:

$$\frac{P_{кр}}{2} \int_0^l (y')^2 \cdot dx = \frac{EJ}{2} \cdot \int_0^l (y'')^2 dx + \sum \frac{k \cdot y_s^2}{2} \dots \dots \dots (8)$$

Левая часть этого уравнения представляет из себя работу внешних сил  $P_{кр}$  при критическом значении их на перемещениях от сближения концов стержня при искривлении. Первый член правой части выражает приращение внутренней потенциальной энергии от изгиба стержня, причем  $J$  есть момент инерции его (в применении к нашему случаю — момент инерции рельса относительно вертикальной оси), а  $E$  — модуль упругости, для рельсовой стали равный  $2,15 \cdot 10^9$  кг/см<sup>2</sup>. Второй член правой части выражает потенциальную энергию, накопленную упругими сопротивлениями, определяемыми приведенным выше уравнением (5). Поставив в уравнение (8) значения  $y$  и его производных, определяемые уравнением (7), и разрешив соответствующие интегралы, получим для критического усилия  $P_{кр}$  следующее выражение:

$$P_{кр} = \frac{EJ \cdot \pi^2}{l^2} + \frac{2 kl}{\pi^2} \cdot \sum_{m=0}^{m=n} \sin^2 \frac{\pi x_s}{l} \dots \dots \dots (9).$$

Абсциссы  $x_s$  здесь соответствуют точкам приложения упругих сопротивлений  $S$ . Если эти сопротивления приложены на равных расстояниях и делят

\*) Исследование простого продольного изгиба стержня в описанных условиях произведено А. Escher'ом (Schweizerische Bauzeitung, 1927 г., № 9).

полную длину стержня на  $n$  равных частей, то уравнение (9) может быть переписано в такой форме:

$$P_{kp} = \frac{EJ\pi^2}{l^2} + \frac{2kl}{\pi^2} \cdot \sum_{m=0}^{m=n} \sin^2 \frac{\pi}{n} \cdot m \dots \dots \dots (10),$$

или, введя обозначение  $l_0 = \frac{l}{n}$  :

$$P_{kp} = \frac{EJ\pi^2}{l_0^2} \frac{1}{n^2} + \frac{2kl_0}{\pi^2} \cdot n \cdot \sum_{m=0}^{m=n} \sin^2 \frac{\pi}{n} \cdot m \dots \dots \dots (11)$$

Первый член правой части этого выражения определяет собою обычное эйлеровское значение критического усилия по отношению к продольному изгибу рельса в горизонтальной плоскости. Величина этого усилия при заданном профиле рельса зависит только от длины рельса  $l$  (или, что то-же самое, от числа  $n$  при заданном значении  $l_0$ ). При увеличении длины рельса, вводимой в расчет, значение этого усилия быстро падает.

Второй член правой части того же выражения определяет увеличение эйлеровской критической силы, происходящее за счет упругих сопротивлений продольному изгибу стержня. Величина этой части полного критического усилия  $P_{kp}$  при заданных  $k$  и  $l_0$  вырастает соответственно с изменением выражения:

$$B = n \cdot \sum_{m=0}^{m=n} \sin^2 \frac{\pi}{n} \cdot m \dots \dots \dots (12)$$

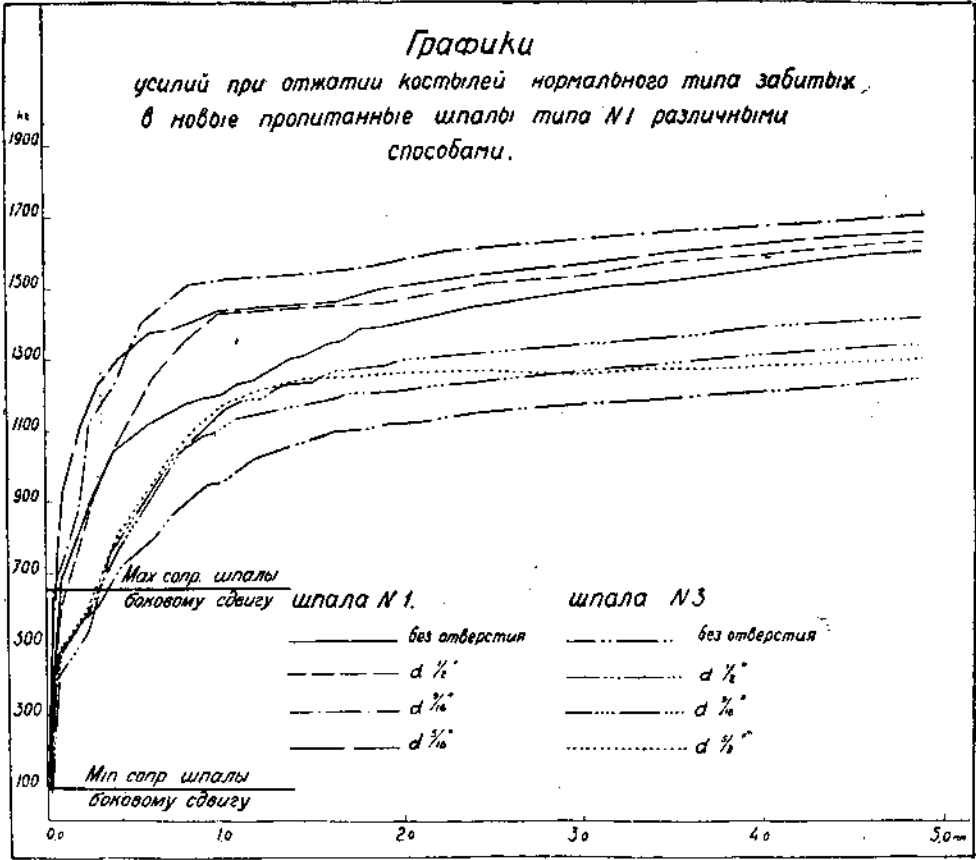
Значение  $B$  при равном последовательно целым числам от 1 до 10 приведены в таблице IV.

Таблица IV.

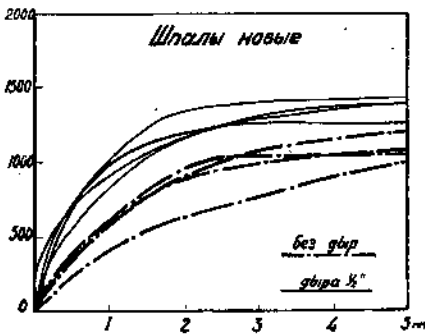
$n =$	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
$B =$	0	2,00	4,50	8,00	12,50	18,00	24,50	32,00	40,50	50,00

Наименьшее значение критического усилия, определяемого суммой вышеуказанных двух членов, из которых один убывает, а другой вырастает при увеличении длины стержня, находится в каждом отдельном случае по заданным значениям жесткости рельса ( $EJ$ ) и коэффициента упругости  $k$  сопротивлений  $s$ . Ниже приведены значения критических усилий, подсчитанные для некоторых типичных условий состояния пути.

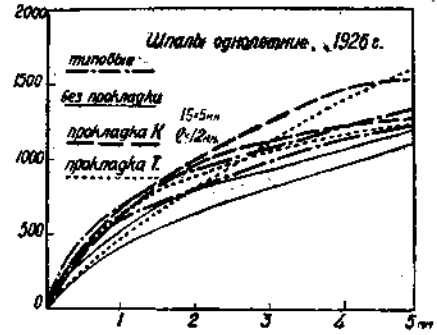
Данные о величине коэффициента упругости  $k$  сопротивлений  $s$ , определяемого при рассмотрении выдвигания пути отношением усилия, отжимающего костыль, к геометрической величине этого отжатия, заимствованы нами из графиков испытания костылей на отжатие, полученных инж. В. П. Крачковским и приведенных на фиг. 46—50. На график 46 и нанесены в виде горизонтальных прямых наибольшие и наименьшие значения сопротивлений шпал боковому перемещению при различных сортах балласта. Эти последние данные получены Путевым Испытательным Бюро путем измерения усилия, потребного для смещения шпалы поперек пути. Измерения эти производились для трех состояний шпалы; 1) когда она со всех сторон, кроме верхней, окружена балластом. 2) когда вдоль одной из ее боковых кромок балласт удален и 3) когда он удален со стороны обеих ее кромок. Во всех случаях из шпалы перед измерением выдергивались костыли и выбивались подрельсовые подкладки. Измерение усилий производилось при помощи пружинных динамометров. Общий вид постановки наблюдений близ ст. Копотоп по-



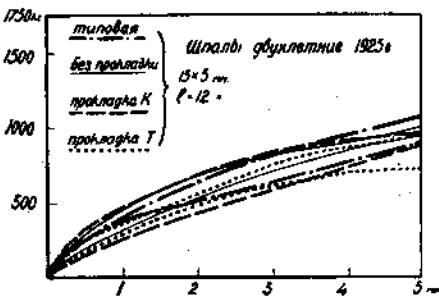
Фиг. 46.



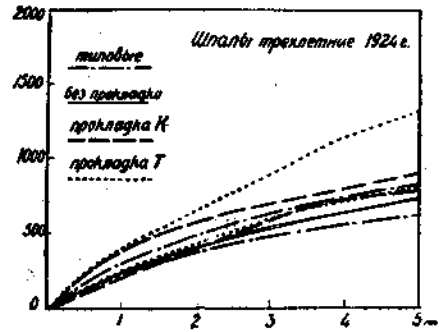
Фиг. 47.



Фиг. 48.



Фиг. 49.



Фиг. 50.



казан на фиг. 51. Результаты этих опытов сведены в таблице V. В ней указаны наибольшие, наименьшие и наиболее часто наблюдавшиеся средние значения сопротивлений для пяти сортов балласта при всех трех перечисленных состояниях шпал. Материал для составления этой таблицы получен на основании измерений, произведенных Путевым Испытательным Бюро НТК в 1926 и 1927 г. на ст. Конотоп М.-К.-В. ж. д.

Сопротивление шпал боковому перемещению, как видно из этой таблицы, даже для одного и того же сорта балласта и при одном и том же состоянии шпал колеблется в широких пределах. Наибольшие сопротивления давали старые шпалы с шероховатой поверхностью, окруженные балластом, а наименьшие — свежие, гладко обтесанные шпалы, окруженные балластом, и шпалы, разрытые вдоль обеих боковых кромок. По сортам балласта наибольшее сопротивление оказывали шпалы, уложенные в щебне.



Фиг. 51.

Широкие пределы колебания величины сопротивления шпал боковому перемещению указывают на то, что в пути всегда найдется несколько шпал, наиболее слабо сидящих в балласте, около одной из которых и начинается описанное выше мгновенное выбрасывание пути.

Перейдем теперь к рассмотрению величин коэффициента упругости  $k$  отжатия костылей, оказывающего непосредственное влияние на величину критического усилия  $P_{кр}$ . Из приведенных на фиг. 46—50 графиков отжатия костылей нормального типа, забитых соответственно в новые, однолетние, двухлетние и трехлетние шпалы, видно, что величина усилия, потребного для отжатия костыля на 1 см, определяемая тангенсом начального угла наклона каждой из кривых, колеблется в самых широких пределах (от 2000 кг/см и выше). В общем с увеличением возраста шпалы сопротивление отжатию сильно уменьшается. Так как величина критического усилия падает с уменьшением коэффициента упругости  $k$ , то, очевидно, в наиболее невыгодных условиях в отношении устойчивости будет находиться путь, лежащий на старых шпалах. Из графика, помещенного на фиг. 50 и касающегося трехлетних шпал, вынутых с пути и перенятых с забивкой пробок в старые отверстия, получаем для минимума коэффициента  $k$  значение  $k_{min} = 2000$  кг/см. Для более старых шпал и при менее тщательной забивке пробок в условиях путевых работ, чем это, нужно думать, делалось при производстве

Т а б л и ц а V.

Сопротивление шпал боковому смещению.

СОРТ БАЛЛАСТА.	Данные о составе балласта.		Сопротивления шпал в кг.			
	Число клеток на 1 см <sup>2</sup> сита.	Количество*) промед. через отверстия сита, % от веса.		Шпала окружена балластом	Шпала разрыта с 1-ой стороны.	Шпала разрыта с 2-х сторон.
Сеймский балласт . . . . .	4	0,00				
	16	0,00	Наиб.	210	200	180
	64	0,00				
	100	0,16	Наим.	70	70	70
	225	2,88				
	500	15,65	Средн.	134	128	114
	900	35,41				
		Распылен-ный **)	45,90			
Дарницкий балласт . . . . .	4	0,00				
	16	0,00	Наиб.	400	230	190
	64	0,03				
	100	0,12	Наим.	210	110	95
	225	1,56				
	500	12,87	Средн.	312	166	138
	900	43,40				
		Распылен-ный **)	42,01			
Малоярославский балласт.	4	7,26				
	16	1,19	Наиб.	600	270	210
	64	14,39				
	100	18,16	Наим.	400	90	80
	225	34,93				
	500	16,09	Средн.	495	193	141
	900	6,56				
		Распылен-ный **)	6,42			

СОРТ БАЛЛАСТА.	Данные о составе балласта.		Сопротивления шпал в кг.			
	Число клеток на 1 см <sup>2</sup> сита.	Количество * пропек. через отверстия сита % от веса.		Шпала окружена балластом	Шпала разрыта с 1-ой стороны	Шпала разрыта с 2-х сторон.
Воронежский балласт . . .	4	11,61				
	16	17,44	Наиб.	410	230	200
	64	43,80				
	100	4,87	Наим.	230	110	105
	225	10,56				
	500	6,50	Средн.	302	184	126
	900	2,27				
	Распылен-ный **)	2,95				
Щебеночный балласт. . .	—	—	Наиб. Наим. Средн.	650 260 457	330 200 257	240 160 202

опытов, могут встречаться в действительности и более низкие значения коэффициента  $k$ , доходящие, весьма возможно, до  $k = 1000 \text{ кг/см}$  и ниже. Во всяком случае, подсчеты, произведенные на основании приведенных данных, имеют лишь ориентировочный характер. Дальнейшее исследование вопроса об устойчивости пути потребует с одной стороны, детального изучения явления отжатия костылей с целью установления минимальных, встречающихся в действительности, значений коэффициента  $k$ , а с другой стороны — непосредственных испытаний звеньев пути на продольный изгиб.

На фиг. 52—54 приведены кривые изменения величины критических усилий в рельсах типа I-A, II-A, III-A и IV-A, подсчитанных по формуле (II) в функции от коэффициента  $k$  и для трех значений расстояния между шпалами:  $l_0 = 70 \text{ см}$ ,  $l_0 = 90 \text{ см}$  и  $l_0 = 140 \text{ см}$ . Последнее расстояние может встречаться при ремонтных работах по смене или перегонке шпал. В отношении устранения сопротивления шпалы продольному изгибу рельса достаточно лишь распить ее, не выводя из-под рельса. Во всех случаях число  $n$  в формуле (II) выбиралось соответственно наименьшему значению критического усилия. Значения моментов инерции сечений рельсов относительно вертикальной оси, принятые в расчете, приведены в таблице VI.

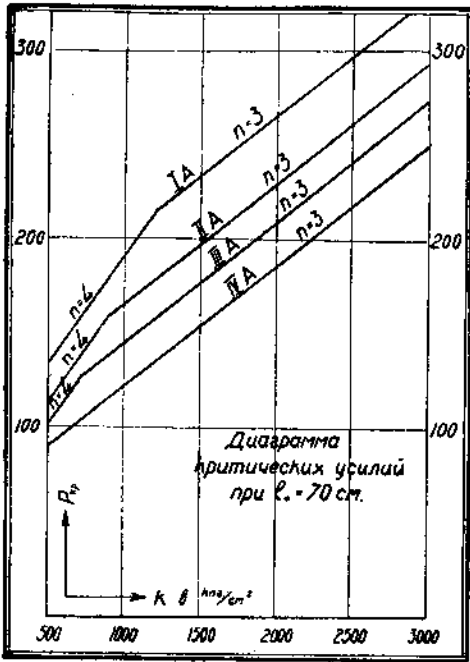
Т а б л и ц а VI.

Тип рельса.	I-A.	II-A.	III-A.	IV-A.
$I = \dots\dots$	284 см <sup>4</sup>	209 см <sup>4</sup>	167 см <sup>4</sup>	120 см <sup>4</sup>

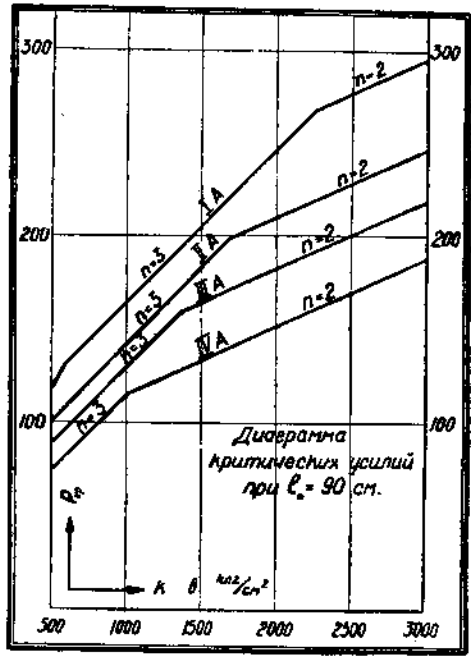
\*) Гранулометрический состав указан, как среднее арифметическое, взятое проф. К. К. Саминским из двух серий испытаний, произведенных в механич. Лаб. Киевского Политехнического Института.

\*\*) В распыленном состоянии принят песок, прошедший последнее сито.

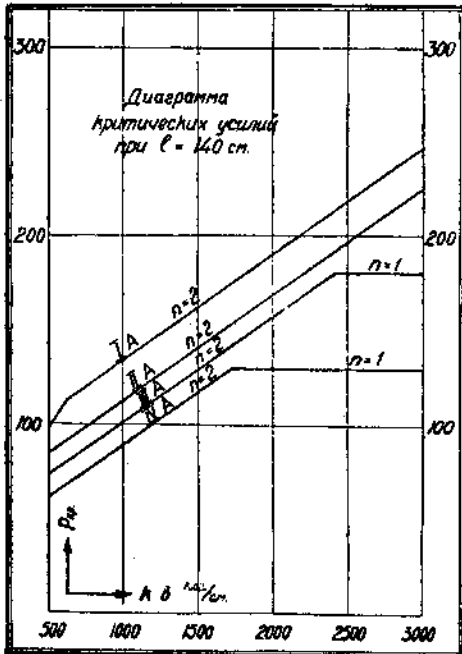
Из рассмотрения кривых (фиг. 52—54) видно, что при значениях коэффициента  $k=1000$  кг/см величины критических усилий для всех рассмотренных состояний пути находятся в пределах 100 — 200 т, а при увеличении коэффициента  $k$  — еще значительно возрастают. Из диаграммы фиг. 54, соответствующей расстоянию  $l_0=140$  см между



Фиг. 52.



Фиг. 53.



Фиг. 55.

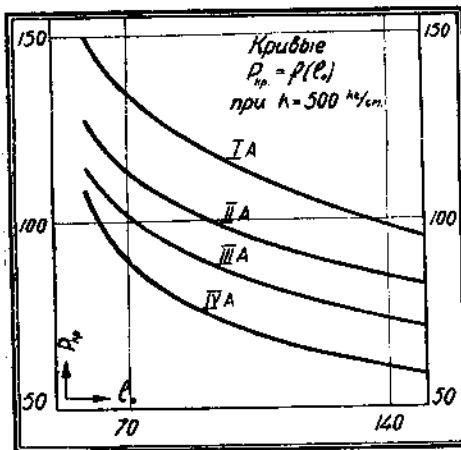
шпалами, оказывающими сопротивление продольному изгибу рельсов, видно, что для рельса типа III—а при  $k > 2420$  кг/см и для рельса типа IV—а при  $k > 1720$  кг/см, критическое усилие остается постоянным и имеет значение, соответствующее простому продольному изгибу ( $n=1$ ) при  $l_0=140$  см. Все это показывает, что свежие шпалы при плотно забитых костылях оказывают настолько сильное сопротивление продольному изгибу рельсов, что выпучивание пути, уложенного на таких шпалах, весьма мало вероятно. Выпучивание такого пути может в действительности быть облегчено воздействием на рельсы горизонтальных поперечных толчков, оказываемых проходящими поездами, ибо при наличии внешних горизонтальных сил, действующих поперек пути, в левой части уравнения (II) прибавится второй член, выражающий работу этих сил на горизонтальных отклонениях рельса. Это, очевидно, приведет к уменьшению величины усилия, при котором выпучивание пути будет возможно. В описаниях случаев выпучива-

ния \*) зачастую встречаются указания на то, что явление это произошло под поездом или непосредственно после его прохода (может быть, под последним вагоном, влияние которого наиболее сильно), что даст практическое подтверждение высказанным соображениям.

Если же коэффициент  $k$  имеет значение, близкое к  $500 \text{ кг/см}$  (возможность таких значений экспериментальными исследованиями пока не подтверждена), то, как видно из диаграммы фиг. 52—54, величины критических усилий падают до значений, реально возможных при высоких температурах в пути с согнанными стыками. Так например, для пути из рельсов типа III—а, при  $k = 500 \text{ кг/см}$  и  $l_0 = 140 \text{ см}$  (при смене или перегонке шпал) получаем  $P_{kp} = 73,6 \text{ т}$ . Усилие такой величины может быть создано в этом рельсе повышенном температуры на

$$t = \frac{P_{kp}}{E\omega\alpha} = \frac{73600}{2,15 \cdot 10^6 \cdot 42,76 \cdot 0,0000108} = 74^\circ$$

против того состояния, при котором рельс не напряжен. Если на достаточно длинном участке пути стыки окажутся согнанными при температуре около  $-5^\circ$ , то в наиболее жаркие летние дни в условиях средней полосы России в рельсах смогут развиться усилия указанной величины, что и повлечет за собой выпучивание пути даже без наличия толчков, оказываемых проходящими поездами.



Фиг. 55.

Изменение величины критических усилий в рельсах с увеличением расстояния между шпалами при постоянном значении коэффициента упругости отжатия костылей представлено для  $k = 500 \text{ кг/см}$  кривыми фиг. 55. Если принять за нормальное расстояние между шпалами  $l_0 = 70 \text{ см}$ , то при увеличении его вдвое вследствие расшивки шпал через одну, критическое усилие, как видно из этих кривых, падает для всех типов рельсов на 30—35%. Это может служить мерой ослабления устойчивости пути при производстве ремонтных работ.

Из рассмотрения диаграмм фиг. 52—54 видно, что для всех представленных на них случаев продольного изгиба пути длина полуволны синусоидальной кривой, по которой изгибается рельс, получается очень небольшой (1,40—2,80 м). Выше было приведено объяснение причин, по которым после выбрасывания в сторону, т.е. во второй фазе явления, путь принимает очертания более плавной кривой с большей длиной полуволны, чем это получается по формуле (II). Практическое же указание на существование 1-й фазы явления, т.е. искривления рельсов за счет одного отжатия костылей (и может быть, некоторого скручивания рельса), можно найти в статье ниже Л. Н. Любимова (Жел.-дор. Дело, прил. «Путь», 1926 г. № 6—7).

При расчете устойчивости пути нельзя не считаться с облегчением условий его выпучивания, вызываемым наличием поперечных толчков от проходящих поездов. Учесть аналитическим путем влияние этих толчков, при полной неопределенности вызываемых ими усилий, практически невозможно. Поэтому единственно правильным будет подсчитывать допустимые значения температурных усилий в рельсах с запасом против теоретических величин критических усилий. Коэффициент запаса должен быть принят в этих расчетах, мне кажется, не менее 3, в виду того, что в теоретическом подсчете мы в этом

\*) Schweizerische Bauzeitung, 1926 г., № 16.

случае недооценивали заведомо известные нам факторы, облегчающие условия неустойчивой деформации.

Если для пути из рельсов типа II—а или III—а, лежащего на старых шпалах при  $k = 1000 \text{ кг/см}$ , подсчитать значения допустимой величины сжимающих температурных усилий с тройным запасом против данных, получаемых по формуле (II) и представленных на фиг. 52—54, то в зависимости от расстояния между шпалами мы получим эти усилия равными 35—55 т. В этих пределах заключаются величины допускаемых сжимающих температурных усилий в рельсах для наиболее часто встречающихся на наших дорогах расчетных условий.

С величиной этих усилий тесно связан вопрос о предельной длине сваренных рельсовых плетей и о конструировании обычных стыков на путях со сваренными рельсами. Укладка непрерывных сваренных рельсовых ниток при современной конструкции и способе укладки пути, вполне очевидно, невозможна. Предельная длина рельсовых плетей определяется, с одной стороны, теоретическими и конструктивными соображениями, а с другой — удобством оперирования с такими рельсовыми плетями при укладке пути или ремонтных работах. Не касаясь второго из этих соображений, разберем, какие ограничения на длину плетей накладывает теоретический расчет.

Длина рельсовых плетей находится в зависимости от величины предельного допустимого сжимающего усилия в рельсе, с одной стороны, и от принципа конструирования стыка этих плетей — с другой. Если в целях уменьшения величины дополнительных напряжений в рельсах от измененной температуры стык конструировать таким образом, чтобы он вовсе не давал сопротивлений удлинениям рельсов (или давал бы лишь незначительное сопротивление), то вопрос из области расчета усилий в рельсах сводится к определению только геометрических размеров предельных стыковых зазоров и длины овальных отверстий в рельсах. При плоских, перпендикулярных к оси рельса концах его, если не делать специальных приспособлений для плавного перехода колеса через стык, зазор не должен превосходить 2—2,5 см. Если при этом условии весь эффект колебаний температуры относить за счет свободных удлинений рельсов, то вопрос о сварке рельсов вообще отпадает, ибо предельная длина рельсовых звеньев, соответствующих этим условиям, получается при годичном колебании температуры рельсов в  $110^\circ$  (напр., от  $-40^\circ$  до  $+70^\circ$ ) равным соответственно 17—21 м. Сварка рельсов такими короткими плетями, длина которых лишь незначительно превосходит возможности современной прокатки рельсов, бессмысленна, ибо 1) принцип устранения частых стыков не будет соблюден, 2) устройство стыка осложнится увязкой двух требований: устойчивости противодействия временной нагрузки и свободы перемещений концов рельсов в стыке, 3) наряду с свободными изменениями длины при колебании температуры, рельсы будут легко подвержены угону.

Вполне логическим представляется заключение, что в пути со сваренными рельсами следует допускать возникновение дополнительных напряжений от изменений температуры. (Собственно говоря, приведенные ранее результаты наблюдений показывают, что это не будет новостью, присущей пути из сваренных рельсов!). Само собою разумеется, напряжения эти потребуются вводить в расчет прочности рельсов. Чем больше будет при заданной величине предельных стыковых зазоров длина рельсовых плетей, тем большая часть температурного воздействия будет идти за счет напряжения в рельсах и тем больше будут эти напряжения. Увеличение этих напряжений вызовет утяжеление профиля рельса, но с другой стороны, вследствие уменьшения числа стыков на км, понизятся эксплуатационные расходы по ремонту пути и подвижного состава. Таким образом, вопрос из области, чисто расчетной, переходит в область отыскания экономически наивыгоднейших решений.

Что касается расчета длины сваренных рельсовых плетей на основании условий прочности и устойчивости, то таковой следует производить по нижеследующей схеме.

Если  $P$  есть предельное сжимающее усилие в рельсе, определяемое либо величиной допустимых дополнительных сжимающих напряжений  $n = \frac{P}{\sigma}$  либо расчетом пути на устойчивость,

$P_1$  — предельное растягивающее напряжение в рельсах, определяемое допустимым сопротивлением стыковых болтов перерезыванию,  
 $a$  — величина наибольшего стыкового зазора,  
 $t$  — расчетное годичное колебание температуры рельсов,  
 $L$  — длина рельсовой плети,  
 то для определения  $L$  можем составить уравнение:

$$\frac{(P + P_1) \cdot L}{E\omega} + a = atL \dots \dots \dots (13),$$

из которого находим:

$$L = \frac{a}{at - \frac{(P + P_1)}{E\omega}} \dots \dots \dots (14)$$

В виду того, что явление угона рельсов, вызывающее перераспределение величин зазоров в отдельных стыках, может создать условия, при которых значения усилий  $P$  или  $P_1$  на отдельных участках пути окажутся больше, чем это принято в расчете, величину суммы  $P + P_1$  следует брать несколько уменьшенной. Вместе с этим уменьшится и значение  $L$ . Если обозначить через  $\mu$  некоторый коэффициент, меньший единицы, то предельная длина рельсовых плетей найдется по формуле

$$L = \frac{a}{at - \frac{\mu(P + P_1)}{E\omega}} \dots \dots \dots (15)$$

Значения коэффициента  $\mu$  должны определиться из наблюдений над угоном сваренных рельсовых плетей на специальных опытных участках пути. Стремление к увеличению длины сваренных плетей потребует применения противоугоных средств.

В качестве примера приводим подсчет предельной длины сваренных плетей из рельсов типа III-а при условиях:

- $a = 2,5 \text{ см}$
- $\alpha = 0,0000108$
- $t = 110^\circ$
- $\mu = 0,90$
- $P = 35000 \text{ кг}$
- $P_1 = 18000$  при трех двухсрезных болтах  $d = 22 \text{ мм}$  с допустимым напряжением  $n_2 = 800 \text{ кг/см}^2$ .
- $E = 2,15 \times 10^6 \text{ кг/см}^2$
- $\omega = 42,76 \text{ см}^2$
- Зачenne  $L$  при этом будет:

$$L = \frac{2,5 \cdot 0,01}{0,0000108 \cdot 110 - \frac{0,90(35000 + 18000)}{2,15 \cdot 10^6 \cdot 42,76}} = \frac{0,025}{0,000669} = 37,4 \text{ м.}$$

Увеличение длины сваренных рельсовых плетей в этом частном случае сверх подсчитанного значения возможно либо за счет увеличения предельного стыкового зазора, либо за счет допущения в рельсах большей величины сжимающих усилий, чем принято в расчете, либо путем уменьшения влияния угона рельсов. Следовательно, разрешение вопроса о применении весьма длинных рельсовых плетей (для рельсов III-а длиной более 40—50 м, а для рельсов типа II-а длиной более 50—60 м) заставит озаботиться 1) о конструкции стыка, допускающей при зазоре, большем 2,5 см, плавное перемещение колеса через стык, 2) о создании достаточной сопротивляемости пути выпучиванию путем усиления скреплений и улучшения среднего качества пути выпучиванию надежном удержании рельсов от угона. Полное устранение явления угона (в том числе

и температурного, сказывающегося в смещениях концов рельсов, вообще говоря неравномерных) эквивалентно непрерывной сварки рельсов, которая потребовала бы с одной стороны усиления профиля рельсов за счет температурных напряжений большой величины, а с другой стороны весьма надежного закрепления рельсов для обеспечения их устойчивости.

Во всяком случае, применительно к каждому частному случаю условий задания, необходимо производить проверку допускаемой длины рельсовых плетей, исходя из условий их прочности (подсчет допускаемых дополнительных напряжений) и из условий устойчивости пути.

Из приведенных выше цифр видно, что допускаемые по расчету на устойчивость усилия в рельсах обычно получаются выше сопротивлений стыков современного типа перемещению концов рельсов между накладками (см. § 2).

Если стык рельсов для сваренных плетей будет оставлен по типу тем же, как и современный (в смысле способности создавать сопротивление смещениям концов рельсов), то следует конструировать его таким образом, чтобы предельное сопротивление его, определяемое формулой (2) (см. § 2) было меньше допускаемого сжимающего усилия в рельсе на величину сопротивления, оказываемого трением от пржатия костылями подошвы рельса на половине длины сваренной рельсовой плети. Говорить о величине этого сопротивления применительно к пути со сваренными рельсами пока преждевременно, так как применение рельсовых плетей большой длины потребует соответствующего усиления прикрепления рельса к шпалам; о величине же сопротивления его продольным смещениям рельсов судить заранее невозможно.

В заключение отметим еще раз, что для всестороннего освещения вопроса об устойчивости пути потребуются еще произвести большое количество экспериментальных исследований, как по изучению всего явления в целом, (непосредственное испытание звеньев пути на продольный изгиб), так и по исследованию отдельных составляющих его факторов (главным образом, изучение отжатия костылей). Изучение этих явлений, временно задержанное недостатком соответствующих средств для необходимого оборудования, составит содержание одних из ближайших исследовательских работ Путьевого Испытательного Бюро НК.

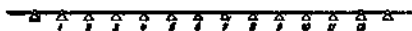
---



## Статический расчет рельсов.

При определении расчетных статических напряжений в рельсе, нагруженном системой паровозных осей, рельс рассматривается как многопролетная неразрезная балка на упругих опорах. Число опор, вводимое в расчет, при этом обычно ограничивается условием, чтобы влияние наиболее удаленных грузов и реакций крайних опор на величину изгибающего момента в рассматриваемом сечении было близко к нулю. Таким образом, в целях упрощения расчета, из рельса, непрерывного по всей своей длине и способного во всех сечениях передавать изгибающий момент и поперечную силу, выделяется ограниченной длины участок, концы которого предполагаются отделенными от примыкающих к ним участков рельса. Загрузка боковых участков при этом не будет сказываться на работе выделенного среднего участка.

Представим себе, что по такому рельсу, с выделенным для расчета средним участком на небольшом числе опор, перемещается некоторый груз. С момента появления этого груза на одном из концов среднего участка, даже если этот конец взят на опоре, весь рельс на протяжении этого участка начнет работать и примет криволинейное очертание вследствие упругой осадки опор. Воздействие груза на расчетный участок в момент его



Черт. 1.

входа на один из концов этого участка таким образом будет внезапным. Для того, чтобы приблизить расчетную схему к действительному характеру работы рельса, мы остановимся на схеме, показанной на черт. 1, а именно при-

чем, что средний участок разграничен от боковых двумя однопролетными балочками, играющими роль, аналогичную роли свободных балок в консольных мостах.

Чем большее число опор назначим мы для расчетного участка рельса, тем ближе подойдем к действительным условиям работы рельса. Практически этот вопрос разрешается условием, чтобы расстояние от исследуемого сечения рельса до крайней опоры выделенного участка было не менее того расстояния, на котором в действительности влияние груза, стоящего на рельсе, становится ничтожно малым.

Из опытов, произведенных Путевым Испытательным Бюро на М.-Киево-Воронежской ж. д. осенью 1927 г., можно заключить, что это расстояние может быть принято равным 5—6 междупшальным промежуткам. На этом расстоянии от переднего колеса паровоза приборы Веггу, измеряющие напряжения в рельсе с точностью до  $21,5 \text{ кг/см}^2$ , еще не дают никакого отклонения от начального отсчета. Напряжения в рельсе в этот момент, следовательно, меньше указанной цены деления прибора, т. е. настолько незначительны, что с ними можно не считаться.

Из сказанного можно вывести заключение, что при теоретическом расчете напряжений в рельсе достаточно принять число опор расчетного участка равным 12-ти. Вопрос сводится, следовательно, к изучению двенадцати-пролетной неразрезной балки на упругих опорах. Исследование такой системы с 10-ю лишними неизвестными путем решения основных уравнений Клапейрона представляет задачу огромной трудности. Метод построения инфлюэнтных линий, предложенный инж. В. П. Крачковским в статье «Расчет пути при действии системы грузов с помощью инфлюэнтных линий»<sup>\*)</sup>, упрощает задачу путем использования принципа симметрии. Однако и при этом задача сводится к решению системы 5-ти уравнений с 5-ю неизвестными, что также требует огромного количества арифметических выкладок, вызывающих неизбежные неточности в окончательных результатах. В настоящей статье предлагается разработанный мною метод расчета неразрезных балок на упругих опорах, при чем при построении инфлюэнтных линий момента и опорного давления мною использован принцип Максвелла о взаимности перемещений.

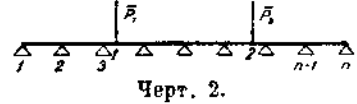
<sup>\*)</sup> См. 54-й Сборник Трудов Научно-Технического Комитета НКПС.

Как видно из последующего изложения, этот метод значительно упрощает задачу построения инфлюэнтных линий для рельса, как для неразрезной балки на упругих опорах и сводит ее в любом случае расчета к решению 2-х уравнений с двумя неизвестными.

Все остальные данные, определяющие очертание инфлюэнтной линии, находятся независимо одна от другой. При этом мы получаем не только значения отдельных ординат инфлюэнтной линии, но и уравнения для отдельных участков ее. Вместе с тем метод, предложенный мною, дает возможность простой и наглядной проверки полученных ординат без необходимости поверочных пересчетов их значений.

Тот же метод может быть применен с некоторыми осложнениями в подсчетах и к несимметричным системам, а также для построения инфлюэнтных линий для неразрезных балок на упругих опорах при неравных пролетах, т.е. к расчету рельса при переменном расстоянии между шпалами.

Приведем доказательство принципа взаимности перемещений применительно к исследуемой нами неразрезной балке на упругих опорах.



Черт. 2.

Пусть на балку с произвольным числом опор (черт. 2) действуют последовательно две нагрузки из единичных вертикальных сил  $P_1$  и  $P_2$ , приложенных соответственно в точках 1 и 2.

Действие нагрузки  $P_1$  мы будем называть первым случаем, а действие нагрузки  $P_2$  — вторым случаем. В первом случае на опорах балки возникнут реакции  $X_1, X_2, \dots, X_n$  и соответствующие им упругие осадки  $\delta_1, \delta_2, \dots, \delta_n$ , а во втором случае — реакции  $X_1', X_2', \dots, X_n'$  и осадки  $\delta_1', \delta_2', \dots, \delta_n'$ . Связь между реакциями и осадками опор для обоих случаев может быть определена соотношением:

$$X = k \cdot \delta \dots \dots \dots (1)$$

где  $k$  есть коэффициент пропорциональности, полагаемый одинаковым для всех опор.

Применяя к рассматриваемой системе принцип Lagrange'a и считая за возможные перемещения для сил первого случая перемещения, соответствующие второму случаю, а за возможные перемещения для сил второго случая — перемещения, соответствующие первому случаю, мы можем написать уравнение:

$$P_1 \cdot \alpha_{12} + X_1 \cdot \delta_1' + X_2 \cdot \delta_2' + \dots + X_n \cdot \delta_n' = P_2 \cdot \alpha_{21} + X_1' \cdot \delta_1 + X_2' \cdot \delta_2 + \dots + X_n' \cdot \delta_n \dots \dots \dots (2)$$

где  $\alpha_{12}$ , есть вертикальное перемещение точки 1 от единичной силы  $P_2$ , приложенной в точке 2, а  $\alpha_{21}$ , — вертикальное перемещение точки 2 от единичной силы  $P_1$ , приложенной в точке 1. Пользуясь соотношением (1), позволим любую опорную реакцию выразить через соответствующую ей упругую осадку опоры, мы можем привести уравнение (2) к такой форме:

$$P_1 \cdot \alpha_{12} + (\delta_1' \cdot \delta_1 + \delta_2' \cdot \delta_2 + \dots + \delta_n' \cdot \delta_n) \cdot k = P_2 \cdot \alpha_{21} + (\delta_1 \cdot \delta_1' + \delta_2 \cdot \delta_2' + \dots + \delta_n \cdot \delta_n') \cdot k \dots \dots \dots (3)$$

Многочлены, заключенные в скобки в левой и правой частях этого уравнения, равны друг другу. Следовательно, имея в виду, что  $P_1 = P_2 = 1$ , мы можем написать:

$$\alpha_{12} = \alpha_{21} \dots \dots \dots (4)$$

Это соотношение и определяет собою принцип взаимности перемещений.

Легко показать, что он одинаково применим и к угловым перемещениям и к перемещениям от единичных моментов.

Из приведенного вывода принципа Maxwell'я видно, что в случае осадочности опор неразрезной балки он справедлив лишь при наличии линейной связи между реак-

цией и осадкой опоры. При всякой иной зависимости между указанными величинами многочлены, заключенные в скобки в уравнении (3), вообще говоря, не будут равны друг другу и равенство (4) не будет справедливо. Но в случае отсутствия линейной зависимости между реакциями опор и соответствующими им осадками выражения опорных давлений и изгибающих моментов в рельсе также не будут линейными относительно нагрузки на рельс. Закон независимости действия сил к такой системе не будет применим, а, следовательно, и самый расчет рельса при помощи инфлюэнтных линий будет невозможен.

Путевое Испытательное Бюро предпринимает ряд опытов с целью освещения вопроса о действительном характере зависимости между давлением и осадкой шпалы. Принятие линейной зависимости в этом случае при теоретическом расчете является неизбежным и изучение действительной зависимости лишь сможет пролить свет на степень точности теоретических подсчетов.

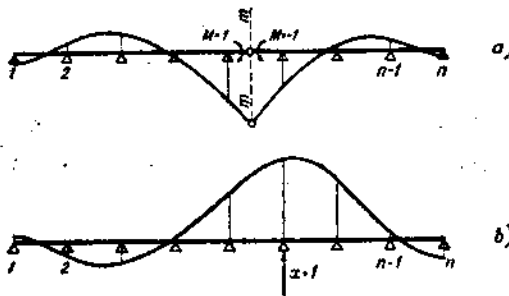
В случае неравноупругих опор, т.е. когда уравнение (1) имеет место, но коэффициент  $k$ , являющийся функцией размеров шпалы и коэффициента постели, имеет различное значение для разных опор, принцип Maxwell'я сохраняет свою справедливость, ибо при этом в многочленах уравнения (3) множитель  $k$  не будет вынесен за скобки, но тем не менее соответственные члены этих многочленов будут попарно равны. Практически случай расчета балки на неравноупругих опорах равноценен случаю расчета балки с неравными пролетами.

Применение принципа Maxwell'я к построению инфлюэнтных линий заключается в следующем. Пусть для неразрезной балки на произвольном числе упругих опор (черт. 3-а) требуется построить инфлюэнтную линию изгибающего момента для какого либо сечения  $m—m$  одного из пролетов. Считая величину момента в этом сечении за одну из лишних неизвестных, представим себе систему с числом неизвестных, на единицу меньшим, чем в заданной системе, для чего предположим, что в сечении  $m—m$  имеется шарнир. При загрузке такой системы произвольно расположенным вертикальным грузом  $P$  обе ветви неразрезной балки, сходящиеся в шарнире  $m—m$ , дадут взаимный

угол поворота  $\alpha_{MP}$ . Для приведения этой системы к основной, этот угол поворота должен быть уничтожен некоторым моментом  $M$ , приложенным с обратными знаками к обоим концам балки, сходящимся в шарнире  $m—m$ . Величина этого момента может быть найдена из уравнения:

$$P \cdot \alpha_{MP} + M \cdot \alpha_{MM} = 0 \quad (5)$$

где  $\alpha_{MP}$  есть угловое перемещение в шарнире от действия силы  $P = 1$ , а  $\alpha_{MM}$  — угловое перемещение в шарнире от действия  $M = 1$ . При  $P = 1$  будем иметь:



Черт. 3.

$$M = - \frac{\alpha_{MP}}{\alpha_{MM}} \quad (6)$$

Знаменатель этого выражения есть постоянная величина, а числитель зависит от местоположения груза  $P = 1$ . Пользуясь принципом Maxwell'я мы можем написать равенство:

$$\alpha_{MP} = \alpha_{PM} \quad (7)$$

которое означает, что угловое перемещение в шарнире от действия произвольно расположенной силы  $P = 1$  равно линейному вертикальному перемещению в точке приложения силы  $P$  от действия двух равных и противоположных единичных моментов, приложенных в шарнире. Следовательно, инфлюэнтная линия величины  $\alpha_{MP}$ , представ-

ляющая из себя в масштабе  $\frac{1}{\alpha_{MM}}$  инфлюэнтную линию момента  $M$ , имеет вид эпюры прогибов нашей неразрезной балки от нагрузки в виде двух равных и противоположных единичных моментов, приложенных в шарнире  $m-m$ . Таким образом задача построения инфлюэнтной линии сводится к нахождению линии прогибов от постоянно расположенной нагрузки. Найдя очертание этой линии прогибов, мы получим интересующую нас инфлюэнтную линию момента из соотношения:

$$M = - \frac{\alpha_{MP}}{\alpha_{MM}} = - \frac{\alpha_{PM}}{\alpha_{MM}} \dots \dots \dots (8)$$

Точно также для построения инфлюэнтной линии опорного давления на одной из опор (черт. 3-б) следует откинуть эту опору и приложить на ней силу  $X$ , удовлетворяющую уравнению:

$$P \cdot \alpha_{XP} + X \cdot \alpha_{XX} = - \frac{X}{k} \dots \dots \dots (9)$$

Из этого уравнения при  $P = 1$  получаем:

$$X = - \frac{\alpha_{XP}}{\alpha_{XX} + \frac{1}{k}} \dots \dots \dots (10)$$

где знаменатель  $\left(\alpha_{XX} + \frac{1}{k}\right)$  есть постоянная величина, а числитель, зависящий от местоположения груза, может быть заменен по принципу Максвелл'я через  $\alpha_{XP} = \alpha_{PX}$ . Следовательно, инфлюэнтная линия опорного давления, выражаемая уравнением:

$$X = - \frac{\alpha_{XP}}{\alpha_{XX} + \frac{1}{k}} = - \frac{\alpha_{PX}}{\alpha_{XX} + \frac{1}{k}} \dots \dots \dots (11),$$

может быть найдена, как линия прогибов неразрезной балки с откинутой опорой  $X$  от единичной силы, приложенной на этой опоре, если эту линию прогибов измерять в масштабе

$$\frac{1}{\alpha_{XX} + \frac{1}{k}}$$


Применение принципа взаимности перемещений сводит, таким образом, задачу построения инфлюэнтной линии к нахождению линии прогибов от постоянно расположенной нагрузки в системе с числом лишних неизвестных, на единицу меньшим, чем в заданной. Дальнейшее упрощение, значительно облегчающее построение указанной линии прогибов для системы со все же еще достаточно большим числом лишних неизвестных, определяется положенным нами в основание предлагаемого метода расчета свойством упругости опор нашей неразрезной балки. В самом деле, представим себе неразрезную  $n$ -пролетную балку на упругих опорах (черт. 4). Пусть на эту балку действует произвольно расположенная нагрузка. Условимся обозначать упругие просадки опор этой балки через  $\delta_i$ , а соответствующие углы наклона линии прогибов на опорах через  $\delta'_i$ , со значком, соответствующим номеру опоры. Представим себе также, что каким-либо путем мы нашли осадку  $\delta_1$  на крайней опоре и соответствующий угол наклона  $\delta'_1$  линии прогибов на той же опоре. Этими двумя данностями вполне определяется уравнение линии прогибов для первого пролета нашей балки, ибо значение реакции на первой опоре найдется из уравнения (1):

$$X_1 = k_1 \cdot \delta_1.$$

Этим самым определится уравнение моментов для первого пролета:

$$M = \kappa_1 \cdot \delta_1 \cdot x - M_0 \dots \dots \dots (12)$$

где  $M_0$  есть момент от активной нагрузки. В уравнении же линии прогибов:



$$y = - \int \int \frac{M}{EJ} dx \cdot dx + C_1 x + C_2 \dots \dots \dots (13)$$

Черт. 4.

значение постоянных интегрирования при отсчитывании абсцисс  $x$  от левой опоры будут соответственно  $C_1 = \delta_1'$  и  $C_2 = \delta_1$ , т.е. величины, предполагаемые известными.

Определив выражение интеграла в уравнении (13) и подставив значение  $x = l_1$ , мы получим просадку  $\delta_2$  второй опоры нашей неразрезной балки. Точно также может быть определен и угол наклона линии прогибов на 2-й опоре из уравнения:

$$y' = - \int \frac{M}{EJ} \cdot dx + C_1 \dots \dots \dots (14)$$

где постоянное интегрирования  $C_1$  имеет прежний смысл  $C_1 = \delta_1'$ .

Имея значения  $\delta_2$  и  $\delta_2'$ , мы найдем по тому же способу уравнения линии прогибов и углов наклона для второго пролета и определим значения  $\delta_3$  и  $\delta_3'$ .

Переходя последовательно от пролета к пролету, мы определим значения всех  $\delta_i$  и  $\delta_i'$ . Не имея численных значений величин  $\delta_1$  и  $\delta_1'$ , мы можем выразить через них в аналитической форме значения всех  $\delta_i$  и  $\delta_i'$ . Вопрос, следовательно, сводится лишь к тому, чтобы разыскать способ определения величин  $\delta_1$  и  $\delta_1'$ . Заметим полутно, что значения  $\delta_i'$  нам нужны лишь как вспомогательные величины для написания уравнений линии прогибов в соответствующих пролетах. Основной же интересующей нас величиной являются значения  $\delta_i$ , имея которые мы сможем найти величины всех опорных реакций, пользуясь уравнением (I).

Для нахождения неизвестных  $\delta_1$  и  $\delta_1'$  воспользуемся статическими условиями равновесия. Вследствие того, что все силы, действующие на систему, предполагаются вертикальными, необходимо и достаточно будет соблюдения двух уравнений статики  $\sum X = 0$  и  $\sum M = 0$ , из которых и определятся наши два неизвестных. Первое из этих уравнений напишется в такой форме:

$$\sum_{i=1}^{i=n+1} \delta_i \cdot \kappa_i = - \sum P \dots \dots \dots (15)$$

и при одном и том же значении коэффициента пропорциональности  $\kappa_i$  для всех опор неразрезной балки:

$$\kappa \cdot \sum_{i=1}^{i=n+1} \delta_i = - \sum P \dots \dots \dots (15^1)$$

Второе же уравнение примет форму:

$$\sum_{i=1}^{i=n+1} \delta_i \cdot r_i = - \mathfrak{M} \dots \dots \dots (16)$$

где  $r_i$  есть расстояние от соответствующей опоры до точки, относительно которой определяется момент внешних сил и за какуюю может быть принята хотя бы одна из крайних опор балки, а  $\mathfrak{M}$  есть момент активной нагрузки относительно той же точки. При постоянстве коэффициента  $k$  для всех опор балки уравнение (16) примет вид:

$$\sum_{i=1}^{i=n+1} \delta_i \cdot r_i = - \frac{\mathfrak{M}}{k} \dots \dots \dots (16^1)$$

Входящие в левые части уравнений (15) и (16) или, соответственно, (15<sub>1</sub>) и (16<sub>1</sub>) величины осадок  $\delta$ , все будут выражены через искомого осадку  $\delta_1$  и угол наклона  $\delta_1'$  на первой опоре. Таким образом мы получим систему из 2-х уравнений с 2-я неизвестными, из которых последние легко могут быть найдены.

Описанный метод исследования неразрезных балок на упругих опорах может быть применен к балкам с совершенно произвольным числом опор, с произвольно расположенной нагрузкой, при любой комбинации величин пролетов балки и при произвольно заданных величинах коэффициента упругости  $k$ , отдельных опор. В любом из указанных случаев задача может быть сведена к решению двух уравнений с двумя неизвестными, после чего остальные данные, характеризующие условия работы неразрезной балки, определяются последовательно одна за другой.

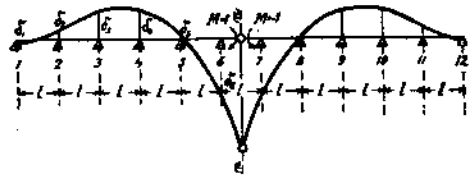
Принятие всех опор равноупругими и всех пролетов равными друг другу сильно упрощает вычислительную работу и позволяет составить таблицы ординат инфлюэнтных линий моментов и опорных давлений для балок с пролетами, равными единице, и при заданной упругости опор. Пользование такими таблицами сводит задачу определения напряжений в рельсах и под постелью шпала до степени элементарно простых.

Тот же способ нахождения упругих осадков опор, определяющих собою очертание линии прогибов, может быть использован при нахождении инфлюэнтных линий моментов и опорных давлений, если при этом применить изложенный выше метод, вытекающий из принципа Максвелла. При этом дело еще значительно облегчается простотой нагрузок в виде единичных моментов или сил, которые следует прилагать к балке для получения инфлюэнтной линии, как линии прогибов. Перейдем к последовательному изложению применения указанных методов к построению инфлюэнтных линий для рельса.

### § 1. Инфлюэнтные линии момента в сечении на середине 6-го пролета 11-типролетной неразрезной балки при равноупругих опорах и равных пролетах.

Этот случай рассмотрен нами применительно к расчету среднего сечения одного из пролетов рельса при расположении грузов на достаточно близких расстояниях по обе стороны исследуемого сечения. В этом случае (напр., при расположении одного из средних колес паровоза над исследуемым сечением) на ближайших к указанному сечению шпалах могут возникнуть лишь реакции, направленные вверх, вследствие чего неточность, обусловленная предположением, что опоры балки (шпалы) одинаково упруги как в случае оседания их, так и в случае приподнятия, не будет сильно сказываться на точности расчета.

Представим себе одиннадцатипролетную неразрезную балку на упругих опорах (черт. 5) с шарниром, поставленным на середине среднего (шестого) пролета. Все пролеты этой балки будем предполагать равными. В целях построения инфлюэнтной линии момента по изложенному выше методу приложим к концам балки, сходящимся в шарнире  $m-m$ , два противоположных по направлению единичных момента  $M=1$ . Линия прогибов балки от этой нагрузки, измеренная в масштабе величины  $\frac{1}{\alpha_{MM}}$ , даст нам искомого инфлюэнтную линию момента. Величина же  $\alpha_{MM}$  в данном случае имеет смысл взаимного угла поворота концов балки, сходящихся в шарнире, или, благодаря симметрии исследуемой системы, удвоенного угла наклона одного из этих концов. Как видим, изучение деформации балки под действием описанной нагрузки из двух противоположных моментов определяет все необходимые данные для построения инфлюэнтной линии момента.



Черт. 5.

Свойство симметрии системы относительно шарнира  $m-m$  позволяет нам рассматривать условия равновесия и деформации каждой из половин неразрезной балки в отдельности. Вполне очевидно, что, вследствие симметричного расположения опор и нагрузки относительно шарнира, концы балки, сходящиеся в шарнире, не будут оказывать друг на друга никакого взаимодействия в виде поперечной силы, что и дает нам право изучать одну из половин, представляющую из себя пятипролетную неразрезную балку с консолью, загруженную единичным моментом на конце консоли, отдельно от другой такой же половины.

Уравнения (15<sup>1</sup>) и (16<sup>1</sup>) в этом случае принимают очень простой вид, а именно:

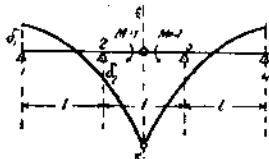
$$\left. \begin{aligned} \sum_{i=1}^{i=6} \delta_i &= 0 \\ \sum_{i=1}^{i=6} \delta_i \cdot r_i &= -\frac{1}{k} \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (17)$$

Относительно знаков ординат линии прогибов (в частности осадок опор балки) и реакций на опорах условимся таким образом: ординаты линии прогибов будем считать положительными, когда они направлены вниз, а реакции опор — положительными, когда они направлены вверх. Как видим, положительным значениям осадки опор соответствуют положительные же значения опорных реакций.

Первое из приведенных уравнений (17) дает возможность быстрой и наглядной частичной проверки вычисленных значений ординат инфлюэнтной линии момента. Как видим, сумма всех ординат инфлюэнтной линии, взятых на опорах балки, на основании этого уравнения должна быть равна нулю \*).

Свойство это использовано нами при проверке цифровых данных приводимой ниже таблицы I ординат инфлюэнтных линий для рассматриваемого случая.

Перед тем, как перейти к дальнейшему изложению построения инфлюэнтных линий момента на середине длины одиннадцатипролетной неразрезной балки, отметим насколько просто разрешается по предлагаемому методу задача построения инфлюэнтной линии момента в среднем сечении среднего пролета трехпролетной неразрезной балки на упругих опорах (черт. 6). (Исследование этого случая нам частично понадобится при построении инфлюэнтной линии момента на середине 2-го пролета семипролетной неразрезной, балки — см. § 2).



Черт. 6.

В виду симметрии этой системы относительно шарнира мы можем также рассматривать одну ее половину независимо от другой и решать для нее отдельно уравнения равновесия (17). В этом случае эти уравнения дают следующее:

$$\left. \begin{aligned} \delta_1 + \delta_2 &= 0 \\ \delta_1 \cdot l &= -\frac{1}{k} \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (17^1)$$

откуда следует, что осадки  $\delta_1$  и  $\delta_2$  равны между собой и обратны по знаку, величина же их определяется формулой

$$\delta_1 = -\delta_2 = -\frac{1}{kl} \dots\dots\dots (18)$$

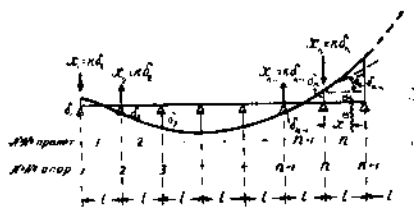
Из этого следует, что ординаты инфлюэнтной линии на опорах 1 и 2 равны между собой и обратны по знаку.

После того, как величины  $\delta_1$  и  $\delta_2$  будут найдены по формуле (18), задача построения инфлюэнтной линии момента становится элементарно простой и свидится к проведению линии прогибов одноконсольной балки, с нагрузкой в виде момента  $M=1$

\*) Значения ординат, подсчитанные н.ж. В. П. Крачковским (см. 54-й Сборник НТК), не удовлетворяют этому условию, что и послужило поводом к их пересчету.

на конце консоли, через две заданные точки, определяемые величинами осадок опор  $\delta_1$  и  $\delta_2$ . Удвоенный угол наклона этой линии прогибов на конце консоли дает нам значение величины  $\alpha_{mm}$ .

Перейдем теперь к построению инфляэнтной линии момента в среднем сечении среднего пролета одиннадцатипролетной неразрезной балки. В виду симметрии системы мы будем изучать лишь левую половину балки. Составление уравнений (12), (13), и (14), дающих возможность выразить осадку и угол наклона линии прогибов на любой опоре через осадку  $\delta_1$  и угол наклона  $\delta_1'$  на первой опоре, сильно упрощается тем, что по всей длине рассматриваемой (напр., левой) половины балки (от опоры 1 до шарнира  $m-m$ ) нет никакой активной нагрузки и выражения момента (12) в любом сечении балки будут слагаться лишь из влияния слева расположенных реактивных сил  $k \cdot \delta_i$ .



Черт. 7.

Для составления общего выражения осадки и угла наклона на любой опоре нашей неразрезной балки, напомним выражение момента в каком-либо сечении  $a-a$   $n$ -го пролета балки (черт. 7) соответственно условию, что вся активная нагрузка расположена справа от этого сечения. Выражение момента должно иметь вид:

$$M = k \cdot (\delta_1 + \delta_2 + \dots + \delta_n) \cdot x + kl \cdot [\delta_1 \cdot (n-1) + \delta_2 \cdot (n-2) + \dots + \delta_{n-2} \cdot 2 + \delta_{n-1} \cdot 1] \dots \dots \dots (19)$$

Подставив это выражение в уравнение (14) и проинтегрировав его, будем иметь:

$$y' = - \int \frac{M}{EJ} dx \quad ; \quad \delta_n' = - \frac{k}{EJ} \cdot (\delta_1 + \delta_2 + \dots + \delta_n) \cdot \frac{x^2}{2} - \frac{kl}{EJ} \cdot [\delta_1 \cdot (n-1) + \delta_2 \cdot (n-2) + \dots + \delta_{n-2} \cdot 2 + \delta_{n-1} \cdot 1] \cdot x + \delta_n' \cdot (20)$$

Путем вторичного интегрирования соответственно уравнению (13) получим:

$$y = - \iint \frac{M}{EJ} \cdot dx dx + \delta_n' \cdot x + \delta_n = - \frac{k}{EJ} \cdot (\delta_1 + \delta_2 + \dots + \delta_n) \cdot \frac{x^3}{6} - \frac{kl}{EJ} \cdot [\delta_1 \cdot (n-1) + \delta_2 \cdot (n-2) + \dots + \delta_{n-2} \cdot 2 + \delta_{n-1} \cdot 1] \cdot \frac{x^2}{2} + \delta_n' \cdot x + \delta_n \dots \dots \dots (21)$$

Эти два уравнения (20) и (21), после подстановки в них значения  $x=l$ , дают нам возможность выразить осадку  $\delta_{n+1}$  и угол наклона  $\delta_{n+1}'$  на  $(n+1)$ -й опоре через осадки всех лево-лежащих опор и угол наклона на  $n$ -ой опоре. Соответствующие выражения, в результате подстановки

$$\frac{kl}{6EJ} = \alpha \dots \dots \dots (22)$$

и приведения подобных членов, принимают вид:

$$\delta_{n+1}' = - \frac{3\alpha}{l} \left\{ \delta_1 \cdot (2n-1) + \delta_2 \cdot (2n-3) + \dots + \delta_{n-2} \cdot 5 + \delta_{n-1} \cdot 3 + \delta_n \right\} + \delta_n' \cdot (23)$$

$$\delta_{n+1} = - \alpha \cdot \left\{ \delta_1 \cdot (3n-2) + \delta_2 \cdot (3n-5) + \dots + \delta_{n-2} \cdot 7 + \delta_{n-1} \cdot 4 + \delta_n \right\} + \delta_n' \cdot l + \delta_n \dots \dots \dots (24)$$



Эти общие выражения дают нам возможность найти осадку и угол наклона на любой опоре через осадки всех предыдущих опор и угол наклона на ближайшей слева опоре. Если идти последовательно от крайней левой опоры, то в результате соответствующих подстановок мы можем найти выражения осадок и углов наклона линии прогибов на всех опорах рассматриваемой балки в функции от величин  $\delta_1$  и  $\delta_1'$ , принятых нами за основные неизвестные. Полученные таким образом выражения служат для составления уравнений равновесия (15<sup>1</sup>) и (16<sup>1</sup>), как в рассматриваемом случае построения инфлюэнтных линий момента на середине длины одинадцатипроцентной неразрезной балки, так и в приводимых ниже (см. §§ 2—4) других случаях построения инфлюэнтных линий.

Выражения для осадок и углов наклона на опорах от 1-й до 6-й в функции от величин  $\delta_1'$  и  $\delta_1$ , определенные по общим формулам (23) и (24), имеют следующий вид:

$$\left. \begin{aligned} \delta_1 &= \delta_1 \cdot 1 \\ \delta_2 &= \delta_1 \cdot \{1 - \alpha\} + \delta_1' \cdot l \cdot 1 \\ \delta_3 &= \delta_1 \cdot \{1 - 9\alpha + \alpha^2\} + \delta_1' \cdot l \cdot \{2 - \alpha\} \\ \delta_4 &= \delta_1 \cdot \{1 - 36\alpha + 17\alpha^2 - \alpha^3\} + \delta_1' \cdot l \cdot \{3 - 10\alpha + \alpha^2\} \\ \delta_5 &= \delta_1 \cdot \{1 - 100\alpha + 135\alpha^2 - 25\alpha^3 + \alpha^4\} + \delta_1' \cdot l \cdot \{4 - 46\alpha + 18\alpha^2 - \alpha^3\} \\ \delta_6 &= \delta_1 \cdot \{1 - 225\alpha + 695\alpha^2 - 298\alpha^3 + 33\alpha^4 - \alpha^5\} \\ &\quad + \delta_1' \cdot l \cdot \{5 - 146\alpha + 153\alpha^2 - 26\alpha^3 + \alpha^4\} \end{aligned} \right\} \dots (25)$$

$$\left. \begin{aligned} \delta_1' &= \delta_1' \\ \delta_2' &= \delta_1' \cdot 1 - \delta_1 \cdot \frac{3\alpha}{l} \cdot 1 \\ \delta_3' &= \delta_1' \cdot \{1 - 3\alpha\} - \delta_1 \cdot \frac{3\alpha}{l} \cdot \{5 - \alpha\} \\ \delta_4' &= \delta_1' \cdot \{1 - 18\alpha + 3\alpha^2\} - \delta_1 \cdot \frac{3\alpha}{l} \cdot \{14 - 13\alpha + \alpha^2\} \\ \delta_5' &= \delta_1' \cdot \{1 - 60\alpha + 42\alpha^2 - 3\alpha^3\} - \delta_1 \cdot \frac{3\alpha}{l} \cdot \{30 - 81\alpha + 21\alpha^2 - \alpha^3\} \\ \delta_6' &= \delta_1' \cdot \{1 - 150\alpha + 285\alpha^2 - 66\alpha^3 + 3\alpha^4\} - \\ &\quad - \delta_1 \cdot \frac{3\alpha}{l} \cdot \{55 - 341\alpha + 212\alpha^2 - 29\alpha^3 + \alpha^4\} \end{aligned} \right\} \dots (26)$$

Как видим, осадки и углы наклона линии прогибов выражаются линейными функциями от  $\delta_1'$  и  $\delta_1$ . Постоянные коэффициенты представляют из себя многочлены, зависящие от величины  $\alpha$ , определяемой выражением (22) и характеризующей жесткость

исследуемой неразрезной балки и ее упругих опор \*). Эта величина легко может быть подсчитана на основании условий задания расчета.

На основании выражений (25) мы можем переписать первое из уравнений (17) в такой форме:

$$\sum_{i=1}^{i=6} \delta_i = \delta_1 \cdot \left\{ 6 - 371z + 848z^2 - 324z^3 + 34z^4 - z^5 \right\} + \\ - \delta'_1 \cdot l \cdot \left\{ 15 - 203z + 172z^2 - 27z^3 + z^4 \right\} = 0 \dots\dots\dots (27)$$

Для составления второго из уравнений (17) условимся определять момент всех сил, действующих на рассматриваемую левую половину балки, относительно шарнира  $m-m$ . Помножив значения  $\delta_i$ , определяемые выражениями (25), на соответствующие значения расстояний  $r_i$  до шарнира  $m-m$  и подсчитав значение суммы

$$\sum_{i=1}^{i=6} \delta_i \cdot r_i,$$

мы получим следующее уравнение:

$$\sum_{i=1}^{i=6} \delta_i \cdot r_i = \delta_1 \cdot l \left\{ 18,0 - 388,5z + 596,0z^2 - 189,0z^3 + 18,0z^4 - 0,5z^5 \right\} + \\ + \delta'_1 \cdot l^2 \left\{ 27,5 - 170,5z + 106,0z^2 - 14,5z^3 + 0,5z^4 \right\} = - \frac{1}{k} \dots\dots\dots (28).$$

Уравнения (27) и (28), представляющие из себя для данного частного случая загрузки балки статические уравнения равновесия, служат для определения основных неизвестных  $\delta_1'$  и  $\delta_1$ . Определив их из этих уравнений, мы можем подсчитать по формулам (25) осадки на всех остальных опорах.

Далее, по формулам (26) мы можем определить углы наклона линии прогибов на всех опорах. После того, как осадки и углы наклона на опорах нам будут известны, мы можем написать уравнения линии прогибов для каждого отдельного пролета балки. В общем виде эти уравнения могут быть представлены, как функции 3-й степени от

$\frac{x}{l}$  т.-е.:

$$y = A \cdot \left( \frac{x}{l} \right)^3 + B \cdot \left( \frac{x}{l} \right)^2 + C \cdot \left( \frac{x}{l} \right) + D \dots\dots\dots (29)$$

Четыре постоянные коэффициента этого уравнения для каждого пролета балки определяются по подсчитанным ранее осадкам и углам наклона линии прогибов на соответствующих опорах. В самом деле, уравнение (29) для какого-либо  $n$ -го пролета балки должно соответствовать условиям:

$$\begin{aligned} \text{при } \frac{x}{l} = 0 \quad y &= \delta_n \\ \text{при } \frac{x}{l} = 1 \quad y &= \delta_{n+1} \\ \text{при } \frac{x}{l} = 0 \quad y' &= \delta'_n \\ \text{при } \frac{x}{l} = 1 \quad y' &= \delta'_{n+1}. \end{aligned}$$

\*) Обычно при расчетах пути для характеристики его жесткости подсчитывается величина  $\gamma = \frac{6EJ}{kl^3}$ . В настоящей статье в целях упрощения выкладок введена величина  $\alpha$ , представляющая из себя  $\alpha = \frac{1}{\gamma}$ .

Подставив эти условия в общее уравнение (29), мы получим следующие значения постоянных коэффициентов:

$$\left. \begin{aligned} A &= l \cdot (\delta'_{n+1} + \delta'_n) - 2 \cdot (\delta_{n+1} - \delta_n) \\ B &= -l (\delta'_{n+1} + 2\delta'_n) + 3 \cdot (\delta_{n+1} - \delta_n) \\ C &= \delta'_n \cdot l \\ D &= \delta_n \end{aligned} \right\} \dots \dots \dots (30)$$

[В частности, для 1-го пролета балки коэффициент В всегда будет равен нулю, так как вследствие того, что момент на крайней левой опоре равен нулю, член 2-й степени в общем уравнении (29) будет отсутствовать. Это условие дает контроль правильности подсчета величин  $\delta_1$  и  $\delta'_1$  по уравнениям (27) и (28)].

Для среднего полупролета балки (от 6-й опоры до шарнира  $m-m$ ) постоянные коэффициенты для уравнения (29) определятся из условий:

$$\begin{aligned} \text{при } \frac{x}{l} &= 0 & y &= \delta_6, \\ \text{при } \frac{x}{l} &= \frac{1}{2} & y &= y_m, \\ \text{при } \frac{x}{l} &= 0 & y' &= \delta'_6, \\ \text{при } \frac{x}{l} &= \frac{1}{2} & y' &= y'_m, \end{aligned}$$

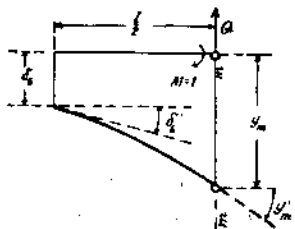
где  $y_m$  и  $y'_m$  — соответственно ордината и угол наклона линии прогибов в шарнире  $m-m$ . Подстановкой этих условий в уравнение (29) получаем:

$$\left. \begin{aligned} A &= 2l \cdot (y'_m + \delta'_6) - 8 \cdot (y_m - \delta_6) \\ B &= -2l \cdot (y'_m + 2\delta'_6) + 12 \cdot (y_m - \delta_6) \\ C &= \delta'_6 \cdot l \\ D &= \delta_6 \end{aligned} \right\} \dots \dots \dots (30')$$

Вследствие того, что сумма  $\sum_{i=1}^{i=6} \delta_i$  на основании первого из уравнения (17)

равна нулю, член 3-й степени в общем уравнении (29) линии прогибов для среднего полупролета, определяющий влияние равнодействующей всех скеловежащих сил, должен обратиться в нуль. Следовательно, коэффициент А, подсчитанный по 1-й из формул (30'), должен быть равным нулю, что дает еще один контроль правильности подсчета осадок и углов наклона линии прогибов.

Величины  $y_m$  и  $y'_m$ , входящие в формулы (30'), могут быть определены из рассмотрения условий работы среднего полупролета нашей балки. Легко видеть, что этот полупролет представляет из себя брус, нагруженный по концам двумя противоположными единичными моментами (черт. 8), при чем прогиб и угол наклона на левом конце этого бруса равны соответственно  $\delta_6$  и  $\delta'_6$ . При этих условиях будем иметь:



Черт. 8

$$\left. \begin{aligned} M &= 1 = const \\ y' &= -\frac{1}{EJ} \cdot x + \delta'_6 \\ y &= -\frac{1}{EJ} \cdot \frac{x^2}{2} + \delta'_6 \cdot x + \delta_6 \end{aligned} \right\} \dots \dots \dots (31)$$

Подставив в два последних уравнения значения  $x = \frac{l}{2}$ , получим.

$$y_m' = \delta_6' - \frac{3\alpha}{kl^2} \dots \dots \dots (32)$$

$$y_m = \delta_6 + \delta_6' \cdot \frac{l}{2} - \frac{3}{4} \cdot \frac{\alpha}{kl} \dots \dots \dots (33)$$

Как видим, подсчитав для заданного значения  $\alpha$  коэффициенты при  $\delta_1$  и  $\delta_1'$  в формулах (25) и (26) и определив величины  $\delta_1$  и  $\delta_1'$  из уравнений (27) и (28), мы будем иметь все необходимые данные для написания уравнения линии прогибов нашей неразрезной одиннадцатипролетной балки в любом из ее пролетов от нагрузки в виде двух противоположных единичных моментов, приложенных в шарнире  $m-m$ . Для перехода от ординат этой линии прогибов к ординатам искомой инфлюэнтной линии момента следует помножить первые на постоянное число  $-\frac{1}{\alpha_{MM}}$ , где  $\alpha_{MM}$  имеет смысл, как указывалось выше, взаимного угла поворота концов балки, сходящихся в шарнире  $m-m$ . Из формулы (32) находим:

$$\alpha_{MM} = 2 \cdot \delta_6' - \frac{3\alpha}{kl^2} \dots \dots \dots (34)$$

Этим заканчивается решение задачи о построении инфлюэнтной линии момента в среднем сечении среднего пролета, одиннадцатипролетной неразрезной балки на упругих опорах.

При решении уравнений (27) и (28), в целях упрощения арифметических выкладок, величины  $\frac{1}{k}$  и  $l$  лучше оставить в виде буквенных множителей. Подсчитанные

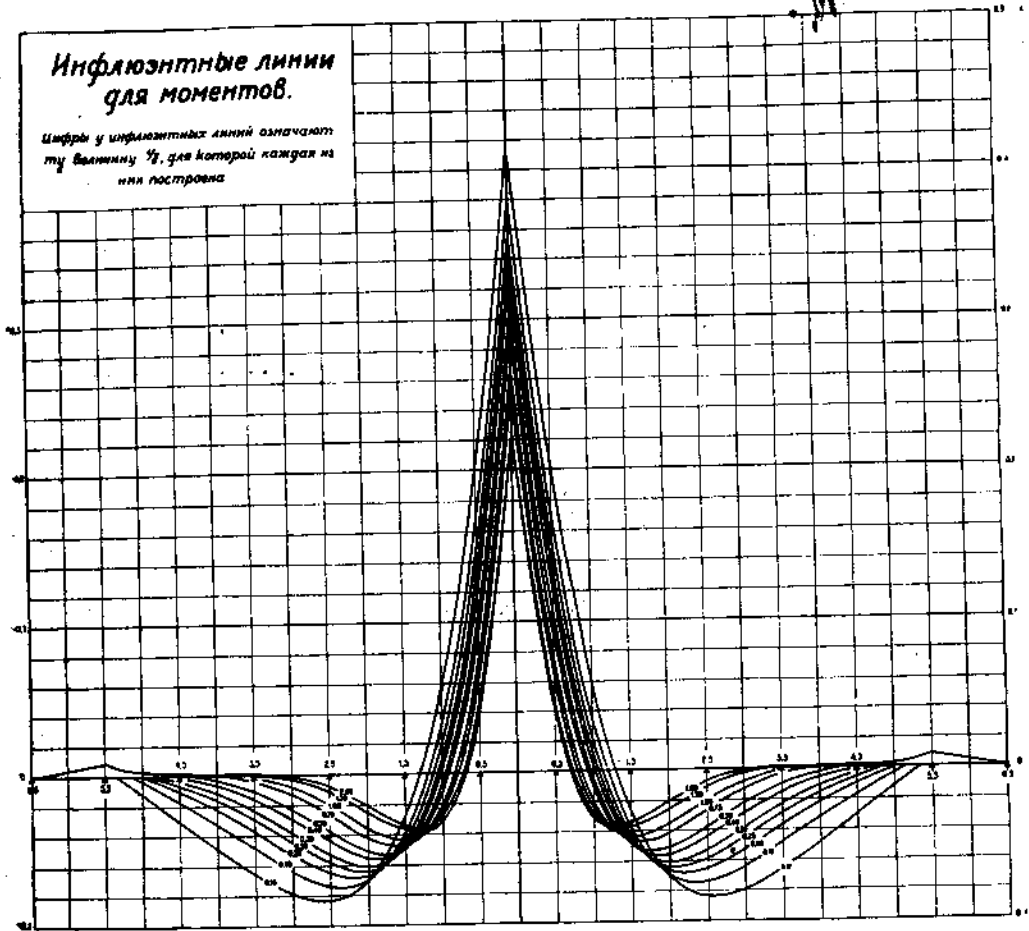
далее величины  $\delta_1$  и  $\delta_1'$  будут соответственно пропорциональны выражениям  $\frac{1}{kl}$  и  $\frac{1}{kl^2}$ . Значение  $\alpha_{MM}$  содержит общий множитель,  $\frac{1}{kl^2}$ , так—что окончательные ординаты инфлюэнтной линии момента будут пропорциональны величине  $l$ , т. е. расстоянию между осями шпал.

Для значений характеристики жесткости пути  $\alpha = 0,10; 0,15; 0,20; 0,25; 0,30; 0,40; 0,50; 0,75; 1,00; 1,50$  и  $2,00$  (или соответственно для  $\gamma = 10,00; 6,67; 5,00; 4,00; 3,33; 2,50; 2,00; 1,33; 1,00; 0,67$  и  $0,50$ ) мною подсчитаны ординаты инфлюэнтных линий момента в среднем сечении среднего пролета для  $l = 1$ . (См. помещенную ниже табл. 1). Вид инфлюэнтных линий для перечисленных значений  $\alpha$  (или  $\gamma$ ) представлен на черт. 9. В таблице I (так же, как и в трех последующих, относящихся к случаям, рассмотренным в §§ 2—4) помимо величин ординат инфлюэнтных линий помещены

табличные разности для интерполяции по  $\left(\frac{x}{l}\right)$  и по  $\alpha$  при практическом использовании таблиц. Числа, помещенные в таблице, представляют из себя отвлеченные коэффициенты, на которые нужно множить произведение  $Pl$  для определения влияния груза  $P$ , расположенного над данной ординатой, на величину момента в исследуемом сечении.

При подсчете помещенных в таблицах ординат инфлюэнтных линий были использованы все отмеченные выше способы контроля промежуточных вычислений, присущие изложенному методу. В таблицах помещены значения ординат с точностью до пятого десятичного знака, с избытком достаточной при полученных абсолютных значениях этих ординат для практических расчетов статических напряжений в рельсах. В подлиннике, хранящемся в делах Путьевого Испытательного Бюро НТК, подсчет ординат произведен с точностью до 6-го десятичного знака для ординат над опорами балки и с точностью до 5-го десятичного знака для промежуточных ординат.

В виду ничтожности влияния грузов, расположенных на расстояниях, больших 5,5 l от исследуемого сечения, на величину момента в этом сечении, от крайних опор исследуемой неразрезной балки инфлюэнтные линии приняты условно направленными по прямой к нулю на следующей опоре (фиг. 9), что соответствует принятой расчетной схеме (черт. 1). Условность такого ограничения инфлюэнтных линий на концах балки при весьма малых значениях соответствующих ординат даст весьма малую по-



Черт. 9.

грешность в теоретическом расчете рельсов. Погрешность против действительности, вызванная неизбежным в теоретическом расчете принятием линейной зависимости между осадками опор и соответствующими опорными реакциями (уравнение 1) и равноупругости опор как при их оседании, так и при поднятии, нужно думать, имеет гораздо большее значение при практическом исследовании напряжений в рельсах, чем погрешность вследствие условного ограничения инфлюэнтных линий момента. Перечисленные условия теоретического расчета, в особенности же, нужно думать, принятие простой пропорциональности осадок шпал передаваемым ими давлениям на балласт (в действительности работа упругих опор рельса сложнее), вызывают отклонение действительных напряжений в рельсах от величин, которые дает теоретический расчет \*). Неизбежные поправки к теоретическому расчету, основанному на этих допу-

\*) См. статью инж. П. С. Дьякова „О работе рельса под действием статической нагрузки“ в этом же выпуске.

нениях, могут дать лишь многочисленные и подробные экспериментальные исследования напряжений в рельсах, вместе с одновременным параллельным изучением остальных факторов, связанных с работой рельсов под статической нагрузкой (осадка шпал, давление их на балласт, очертание линии прогибов рельса, перераспределение давлений отдельных колес паровоза вследствие разности осадок отдельных точек рельса и работы рессор).

## § 2. Инфлюэнтные линии момента на середине 2-го пролета семипролетной неразрезной балки на упругих опорах.

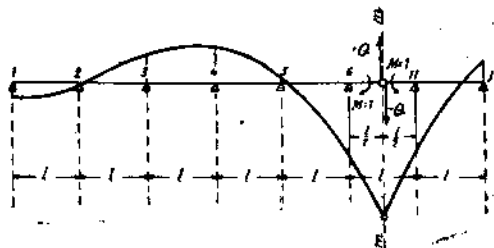
Этот случай рассмотрен применительно к расчету статических напряжений в рельсах под крайними из грузов, расположенных на достаточно близких расстояниях (напр., под передним колесом паровоза). В этом случае в пределах незагруженной части рельса опоры его приподнимаются вверх соответственно с очертанием линии прогибов непрерывного по своей длине рельса и принятие этих опор равноупругими при их приподнятии с оседающими под вертикальным давлением вниз опорами дало бы в этом случае слишком большую теоретическую погрешность. В виду этого при данном расположении нагрузки мы ограничим длину незагруженной части рельса второй опорой от исследуемого сечения, откинув все последующие опоры, на ближайших из которых в обычных условиях жесткости пути должны бы появиться отрицательные опорные реакции. Таким образом, мы приходим к расчетной схеме, изображенной на черт 10, в виде семипролетной неразрезной балки на упругих опорах. Инфлюэнтные линии момента будем строить для среднего сечения  $m-m$  второго справа пролета этой балки.

Для построения инфлюэнтной линии момента представим себе в исследуемом сечении  $m-m$  шарнир, а к концам балки, сходящимся в этом шарнире, приложим два противоположных единичных момента  $M = 1$ . При исследовании линии прогибов части балки, расположенной слева от шарнира, рассматривать эту часть независимо от правой части балки в этом случае непосредственно нельзя, ибо в шарнире  $m-m$  возникнет поперечная сила  $Q$ , обуславливающая взаимодействие двух частей балки, сходящихся в шарнире, и определяемая из условия равенства прогибов обоих концов в шарнире  $m-m$ . Определив величину этой поперечной силы, мы все же сможем изучать левую часть балки независимо от правой, считая ее загруженной в шарнире  $m-m$  не только моментом  $M = 1$ , но еще вертикальной силой, равной по величине указанной поперечной силе  $Q$ .

Для нахождения величины поперечной силы  $Q$  определим выражения прогибов концов левой и правой частей балки, сходящихся в шарнире  $m-m$ , соответственно условию загрузки этих частей балки двумя противоположными моментами  $M$  и двумя противоположными вертикальными силами  $Q$  в шарнире  $m-m$ , как показано на чертеже 10. Для левой части, представляющей из себя пятипролетную неразрезную балку на упругих опорах с консолью, выражение для прогиба на конце консоли будет иметь вид

$$y_m = \frac{M^2}{8EJ} - \frac{Ql^3}{24EJ} + \delta_6' \cdot \frac{l}{2} + \delta_6 = M \frac{3\alpha}{4kl} - Q \frac{\alpha}{4k} + \delta_6' \cdot \frac{l}{2} + \delta_6 \dots (35)$$

Правая от шарнира  $m-m$  часть балки представляет из себя простую одноконсольную балку на упругих опорах, т.е. одну из половин трехпролетной неразрезной балки, рассмотренной вкратце в предыдущем параграфе. Разницу от условий указанного случая составляет наличие в шарнире, помимо нагрузки в виде единичного момента, попе-



Черт. 10.

реальной силы  $Q$ . Уравнения равновесия при обозначениях, соответствующих черт. 10, в этом случае будут иметь вид:

$$\begin{aligned} k \cdot (\delta_I + \delta_{II}) &= Q \\ k \cdot l(1,5\delta_I + 0,5\delta_{II}) &= -M \end{aligned}$$

Из этих уравнений находим:

$$\left. \begin{aligned} \delta_I &= -\frac{M}{kl} - \frac{Q}{2k} \\ \delta_{II} &= \frac{M}{kl} + \frac{3Q}{2k} \end{aligned} \right\} \dots \dots \dots (36)$$

Для углов наклона на опорах I и II линии прогибов рассматриваемой правой части балки мы можем получить, после интегрирования уравнения моментов и соответствующих подстановок, следующие выражения:

$$\left. \begin{aligned} \delta_I' &= \frac{\delta_{II} + (\alpha - 1) \delta_I}{l} \\ \delta_{II}' &= \frac{\delta_{II} - (2\alpha + 1) \delta_I}{l} \end{aligned} \right\} \dots \dots \dots (37)$$

Значение прогиба на конце консоли нашей балки под нагрузкой из  $M$  и  $Q$  на конце консоли определяется выражением:

$$y_m = M \cdot \frac{3\alpha}{4kl} + Q \cdot \frac{\alpha}{kl} + \delta_{II}' \cdot \frac{l}{2} + \delta_{II}$$

Подставив в это выражение значение  $\delta_{II}$ , определяемое формулой (36), и значение  $\delta_{II}'$ , выразив его по формуле (37) через  $M$  и  $Q$  соответственно соотношениям (36), мы получим для прогиба на конце консоли следующее выражение:

$$y_m = Q \cdot \frac{3\alpha + 10}{4k} + M \cdot \frac{7\alpha + 8}{4kl} \dots \dots \dots (38)$$

Приравняв значения прогиба  $y_m$  для левой и правой частей изучаемой балки, определяемые формулами (35) и (38), мы получим для поперечной силы  $Q$ , возникающей в шарнире  $m$ — $n$ , следующее выражение:

$$Q = -\frac{M}{l} \frac{4\alpha + 8}{4\alpha + 10} + \delta_6' \cdot \frac{2kl}{4\alpha + 10} + \delta_6 \cdot \frac{4k}{4\alpha + 10} \dots \dots \dots (39)$$

или, после деления на величину  $k$ :

$$\frac{Q}{k} = -M \cdot \frac{1}{kl} \frac{\alpha + 2}{\alpha + 2,5} + \delta_6' \cdot \frac{l}{2} \frac{1}{\alpha + 2,5} + \delta_6 \frac{1}{\alpha + 2,5} \dots \dots (39)$$

Как видим, величина поперечной силы  $Q$  в шарнире может быть выражена через осадку  $\delta_6$  и угол наклона  $\delta_6'$  линии прогибов левой части балки на 6-й опоре.

Рассматривая эту поперечную силу, как внешнюю активную нагрузку на левую часть балки, мы должны будем написать основные уравнения равновесия (15) и (16) в такой форме:

$$\left. \begin{aligned} \sum_{i=1}^{i=6} \delta_i &= -\frac{Q}{k} \\ \sum_{i=1}^{i=6} \delta_i \cdot r_i &= -\frac{1}{k} \end{aligned} \right\} \dots \dots \dots (40)$$

При этом во втором уравнении момент опорных реакций  $\delta_6$ , следует брать относительно шарнира  $m$ — $n$ , дабы в него не вошел момент от силы  $Q$ . При этом условии

второе уравнение оказывается вполне тождественным по смыслу и по форме с уравнением (28), выведенным в предыдущем параграфе и содержащем два основных неизвестных  $\delta_1$  и  $\delta_1'$ .

Первое из уравнений (40) может также быть сведено к уравнению с двумя теми же неизвестными  $\delta_1$  и  $\delta_1'$ , так как левая часть его имеет тот же смысл, что и левая часть уравнения (27), выведенного в § 1, а в нее входят только указанные выше два неизвестных. Величины же  $\delta_6$  и  $\delta_6'$ , входящие в выражение (39') для величины  $\frac{Q}{k}$ , могут быть представлены в функции от  $\delta_1$  и  $\delta_1'$  на основании формул (25) и (26). Введя по отношению к коэффициентам при  $\delta_1$  и  $\delta_1'$  в формулах (25) и (26), определяющих значения  $\delta_6$  и  $\delta_6'$ , обозначения:

$$\left. \begin{aligned} \left\{ 1 - 225\alpha + 695\alpha^2 - 298\alpha^3 + 33\alpha^4 - \alpha^5 \right\} &= a \\ \left\{ 5 - 146\alpha + 153\alpha^2 - 26\alpha^3 + \alpha^4 \right\} &= a_1 \\ \left\{ 55 - 341\alpha + 212\alpha^2 - 29\alpha^3 + \alpha^4 \right\} &= d \\ \left\{ 1 - 150\alpha + 285\alpha^2 - 66\alpha^3 + 3\alpha^4 \right\} &= d_1 \end{aligned} \right\} \dots \dots \dots (41),$$

мы можем представить выражение (39') при  $M=1$  в следующей форме:

$$\frac{Q}{k} = -\frac{1}{kl} \cdot \frac{\alpha + 2}{\alpha + 2,5} + \delta_1 \cdot \frac{(2\alpha - 3\alpha d)}{2(\alpha + 2,5)} + \delta_1' \cdot l \cdot \frac{(2a_1 + d_1)}{2(\alpha + 2,5)} \dots \dots (42).$$

Пользуясь выражением (42), определяющим величину  $\frac{Q}{k}$  в функции от основных неизвестных  $\delta_1$  и  $\delta_1'$ , мы получим окончательно первое из уравнений (40) в такой форме:

$$\begin{aligned} \delta_1 \cdot \left\{ 6 - 371\alpha + 848\alpha^2 - 324\alpha^3 + 34\alpha^4 - \alpha^5 + \frac{(2\alpha - 3\alpha d)}{2(\alpha + 2,5)} \right\} + \\ + \delta_1' \cdot l \cdot \left\{ 15 - 203\alpha + 172\alpha^2 - 27\alpha^3 + \alpha^4 + \frac{(2a_1 + d_1)}{2(\alpha + 2,5)} \right\} = \\ = + \frac{1}{kl} \cdot \frac{\alpha + 2}{\alpha + 2,5} \dots \dots \dots (43). \end{aligned}$$

Постоянные коэффициенты при  $\delta_1$  и  $\delta_1'$  и свободный член этого уравнения легко могут быть подсчитаны по заданной характеристике  $\alpha$  жесткости пути. Решив это уравнение совместно с уравнением (28) относительно неизвестных  $\delta_1$  и  $\delta_1'$  и подставив их значения в формулы (25), мы получим величины осадков всех опор левой части балки. В пределах пяти пролетов балки (между опорами 1-й и 6-й) уравнения линии прогибов найдутся по тому же методу, что и в изложенном в предыдущем параграфе случае. Для полупролета между 6-й опорой и шарниром  $m-m$  значения постоянных коэффициентов в уравнении линии прогибов в этом случае найдутся по тем же формулам (30'), что и в случае, рассмотренном в § 1, но величины  $y_m$  и  $y_m'$  определяются иными формулами, вследствие наличия в шарнире поперечной силы  $Q$ . Определив значения  $\delta_1$  и  $\delta_1'$  из уравнений (28) и (43), мы можем для каждого заданного значения  $\alpha$  подсчитать и значение поперечной силы  $Q$  по формуле (42). Зная же величину силы  $Q$ , можем определить значения прогиба  $y_m$  и угла наклона  $y_m'$  левой части балки в шарнире  $m-m$  из рассмотрения условий работы полупролета между 6-й опорой и шарниром  $m-m$  (черт. 11).

Прогиб  $y_m$  при этом определится формулой (35), а для угла наклона  $y_m'$  получим следующее выражение:

$$y_m' = \frac{3\alpha}{kt^2} - \frac{3}{4} \cdot \frac{Q}{k} \cdot \frac{\alpha}{l} + \delta_6' \dots \dots \dots (44)$$



Формулы (35) и (44) дают все необходимые данные для построения линии прогибов в последнем полупролете левой части балки.

Для перехода от линии прогибов балки к инфлюэнтной линии момента в исследуемом сечении остается определить значение постоянного множителя  $\frac{1}{\alpha_{MM}}$ . Величина  $\alpha_{MM}$ , как указывалось, имеет смысл взаимного угла поворота концов балки, сходящихся в шарнире  $m-t$ , или, иначе говоря, суммы углов наклона  $y_{m1}'$  и  $y_{m1}'$  (черт. 10). Значение  $y_{m1}'$  определяется формулой (44), а для  $y_{m1}'$  мы можем вывести из рассмотренных условий деформации правой от шарнира  $m-t$  части балки формулу:

$$y_{m1}' = \frac{3\alpha}{kl^2} + \frac{3Q}{4k} - \frac{\alpha}{l} + \delta_{II}',$$

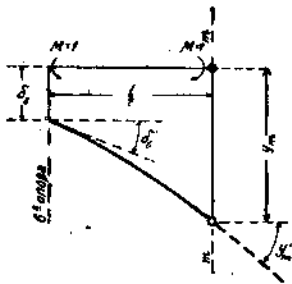
или после подстановки значения  $\delta_{II}'$  по формуле (37) и далее значения  $\delta_I$  и  $\delta_{II}$  по формулам (36):

$$y_{m1}' = \frac{5\alpha + 2}{kl^2} + \frac{Q}{k} \cdot \frac{1}{l} (1,75\alpha + 2) \dots \dots \dots (45)$$

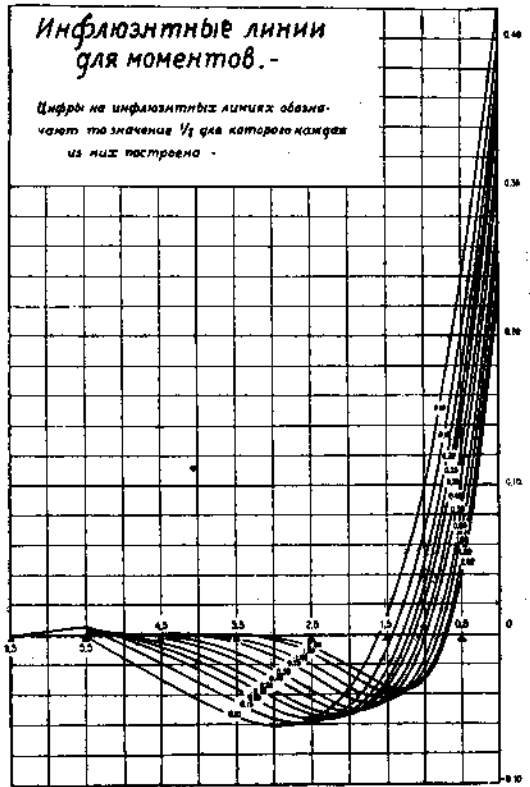
Просуммировав значения  $y_{m1}'$  и  $y_{m1}'$ , определяемые формулами (44) и (45), мы легко получим значение постоянного множителя  $\frac{1}{\alpha_{MM}}$ .

Приведенная выше формула (38) дает нам возможность проконтролировать правильность подсчета значения  $y_m$  по формуле (35), ибо обе эти формулы, очевидно, должны привести к одному и тому же результату.

На основании изложенных в настоящем параграфе формул мною подсчитаны ординаты инфлюэнтных линий момента для тех же значений  $\alpha$ , что и для среднего пролета один-



Черт. 11.



Черт. 12.

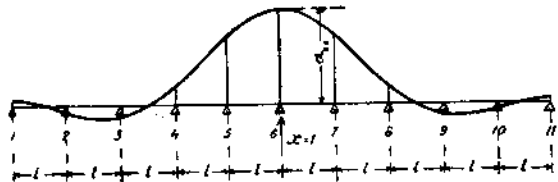
наддвупролетной балки. Значения ординат и соответствующих табличных разностей для интерполяции по  $(\alpha)$  и по  $\frac{x}{l}$  приведены в таблице II, помещенной ниже, а вид инфлюэнтных линий показан на чертеже 12. Как видно, значения наибольших расчетных ординат над исследуемым сечением в этом случае близки к значениям соответствующих ординат для случая, рассмотренного в § 1.

Пользование таблицей II при подсчете моментов ничем не отличается от такового для таблицы I.

**§ 3. Инфлюэнтные линии опорного давления на средней опоре десятипролетной неразрезной балки на упругих опорах.**

Этот случай рассмотрен применительно к расчету опорного давления на шпалу под одним из средних грузов из нескольких, расположенных на достаточно близких расстояниях (напр., под одним из средних колес паровоза). Схема решения этой задачи изложена в общей части, помещенной в начале статьи.

Для построения искомой инфлюэнтной линии на средней опоре десятипролетной неразрезной балки откинем временно эту опору и приложим на ее месте вертикальную единичную силу  $X=1$ , направленную вверх (черт. 13). Линия прогибов балки, измеренная в масштабе величины —



Черт. 13.

$\frac{1}{2lx + k}$  дает нам искомую инфлюэнтную линию опорного давления.

Для построения линии прогибов нашей балки от нагрузки в виде единичной силы  $X=1$  на средней опоре рассмотрим, к какому виду приводятся в этом случае основные уравнения равновесия (15<sup>1</sup>) и (16<sup>1</sup>). При составлении этих уравнений мы можем, в виду симметрии исследуемой системы относительно средней опоры, рассматривать одну из ее половин (напр., левую) отдельно от другой, учитывая соответствующие условия загрузки и деформации. Сумма реакций опор левой половины балки должна, очевидно, равняться половине силы  $X=1$ . Следовательно, уравнение (15<sup>1</sup>) в этом случае приведет к виду:

$$\sum_{i=1}^{i=5} \delta_i = - \frac{1}{2k} \dots \dots \dots (46)$$

Для составления второго условия равновесия левой половины балки, согласно уравнению (16<sup>1</sup>), нам потребовалось бы определить величину момента в сечении балки над откинутой опорой при действии на всю систему силы  $X=1$ . Величина этого момента могла бы быть найдена из условия равенства углов наклона линии прогибов над откинутой средней опорой для левой и правой половины балки. Из условия симметрии балки непосредственно вытекает, что указанный угол наклона на средней опоре равен нулю. Таким образом в этом случае мы можем, в целях упрощения решения, заменить уравнение равновесия (16<sup>1</sup>) уравнением равенства нулю угла наклона линии прогибов над 6-й опорой. Осадки опор и пропорциональные им опорные реакции, удовлетворяющие этому условию деформации системы, будут, очевидно, удовлетворять и условию равновесия (16<sup>1</sup>).

Таким образом, второе уравнение для определения основных неизвестных  $\delta_1$  и  $\delta_1'$  в этом случае будет иметь вид:

$$\delta_6' = 0 \dots \dots \dots (47)$$

Уравнения (46) и (47) на основании формул (25) и (26), выведенных в § 1, могут быть приведены к следующему виду:

$$\left. \begin{aligned} \delta_1 \left\{ 5 - 146\alpha + 153\alpha^2 - 26\alpha^3 + \alpha^4 \right\} + \\ + \delta_1' \cdot l \cdot \left\{ 10 - 57\alpha + 19\alpha^2 - \alpha^3 \right\} &= - \frac{1}{2k} \\ \delta_1' \left\{ 1 - 150\alpha + 285\alpha^2 - 66\alpha^3 + 3\alpha^4 \right\} - \\ - \delta_1 \cdot \frac{3\alpha}{l} \cdot \left\{ 55 - 341\alpha + 212\alpha^2 - 29\alpha^3 + \alpha^4 \right\} &= 0 \end{aligned} \right\} \dots \dots \dots (48)$$

Решив эти два уравнения относительно неизвестных  $\delta_2$  и  $\delta_2'$  и подсчитав по полученным значениям их величины осадок  $\delta_2$  и углов наклона  $\delta_2'$  на всех остальных опорах левой половины балки, мы будем иметь все необходимые данные для построения линии прогибов. Постоянные коэффициенты в уравнении (29) в этом случае для всех пяти пролетов половины балки найдутся из формул (30).

Значения постоянного множителя —  $\frac{1}{\alpha_{XX} + \frac{1}{k}}$ , служащего для перехода от

ординат линии прогибов балки от нагрузки в виде единичной силы  $X = 1$  к ординатам инфлюэнтной линии опорного давления  $X$ , в этом случае подсчитывается чрезвычайно просто, ибо величина  $\alpha_{XX}$  представляет из себя прогиб на откинутой средней опоре от силы  $X = 1$ , приложенной на той же опоре, т. е. величину, уже определенную предыдущим решением.

Для значений характеристики жесткости пути  $\alpha$ , перечисленных в параграфе первом, мною подсчитаны ординаты инфлюэнтных линий опорного давления, помещенные вместе с соответствующими табличными разностями в приводимой ниже таблице III. Общий вид этих инфлюэнтных линий опорного давления представлен на черт. 14.

Цифры, приведенные в таблице III, представляют из себя отвлеченные величины, так что при практическом пользовании таблицей для получения величины опорного давления на шпалу следует помножить величину груза на ординату инфлюэнтной линии, расположенной под ним и взятую по величине из таблицы III.

#### § 4. Инфлюэнтные линии опорного давления на 6-й опоре шестипролетной неразрезанной балки на упругих опорах.

В этом параграфе рассмотрен случай, касающийся расчета опорного давления на шпалу под одним из крайних колес паровоза. Так же, как при определении момента под крайними колесами паровоза (см. § 2), в этом случае длину балки с незагруженной стороны ограничиваем одним пролетом, откинув все последующие опоры, как непринимающие участия в уравновешивании расположенной на рельсе нагрузки.

Для построения искомой инфлюэнтной линии откинем временно 6-ю опору нашей балки и приложим на ней вертикальную, направленную вверх единичную силу  $X = 1$  (черт. 15). Основные уравнения равновесия (15') и (16') в этом случае наиболее удобно написать в следующей форме:

$$\left. \begin{aligned} \sum_{i=1}^{i=5} \delta_i + \delta_7 &= -\frac{1}{k} \\ \sum_{i=1}^{i=5} \delta_i \cdot r_i &= -\frac{1 \cdot l}{k} \end{aligned} \right\} \dots \dots \dots (49).$$

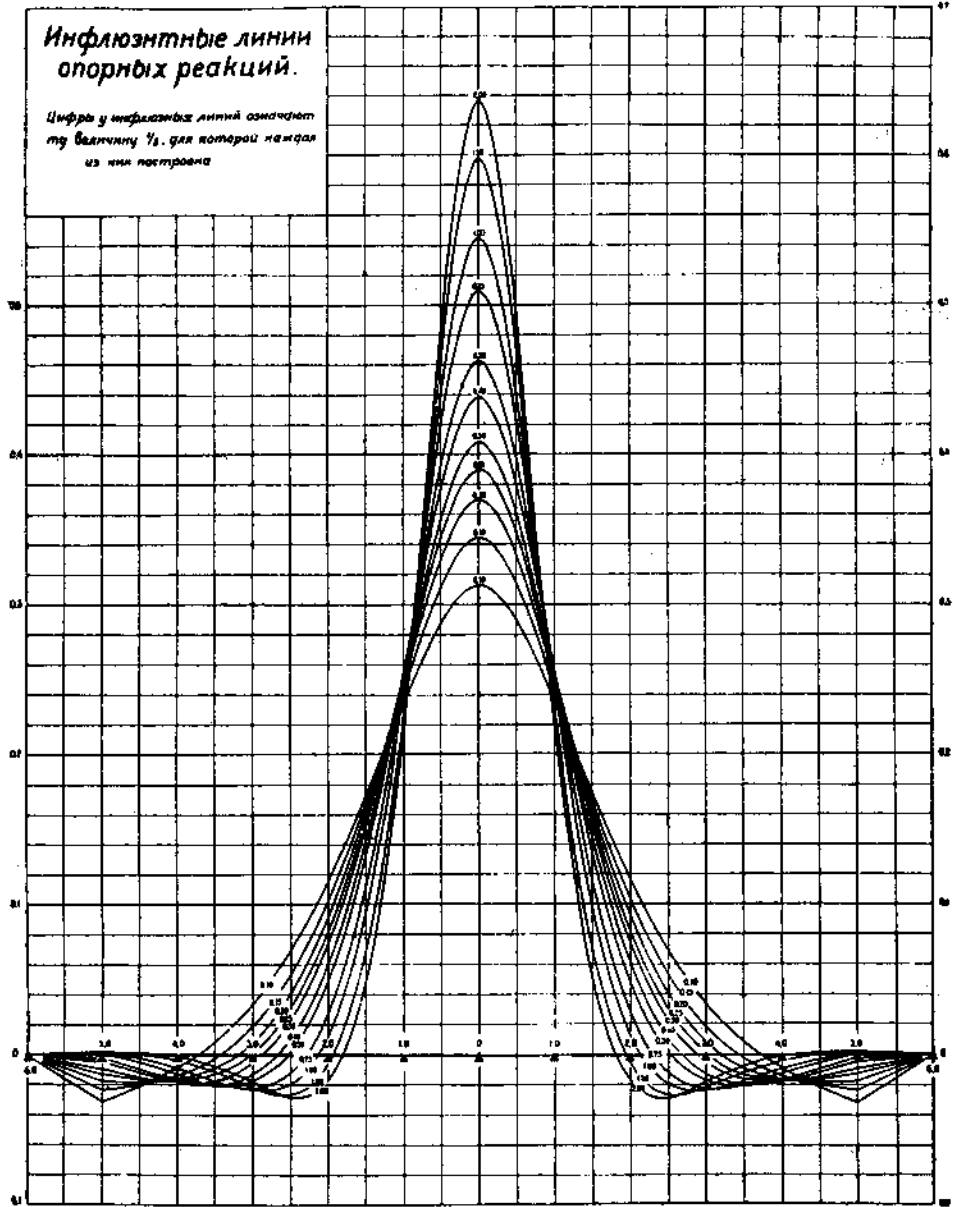
При составлении второго из этих уравнений имелось в виду, что момент опорных реакций ( $k\delta_6$ ) и силы  $X$  берется относительно 7-й опоры, ибо при этом реакция самой 7-й опоры ( $k\delta_7$ ) в это уравнение не войдет.

Для приведения первого из уравнений (49) к виду уравнения, содержащего лишь два основных неизвестных  $\delta_1$  и  $\delta_1'$ , следует выразить осадку  $\delta_7$  на 7-й опоре через указанные две величины. Для этой цели напишем выражения прогиба и угла наклона в точке приложения силы  $X$  (на 6-й опоре), рассматривая отдельно левую и правую (от 6-й опоры) части балки. Из рассмотрения левой части, будем иметь на основании формул (25) и (26):

$$\left. \begin{aligned} \text{лев. } \delta_6 &= a \cdot \delta_1 + a_1 \cdot l \cdot \delta_1' \\ \text{лев. } \delta_6' &= -\frac{3}{l} \alpha \cdot d \cdot \delta_1 + \delta_1' \cdot d_1 \end{aligned} \right\} \dots \dots \dots (50).$$

где обозначения  $a$ ,  $a_1$ ,  $d$  и  $d_1$ , соответствуют формулам (41).

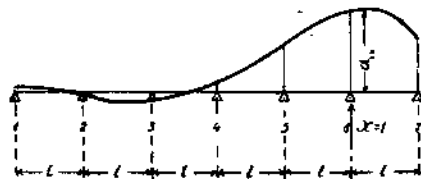
Для правой от точки приложения силы  $X$  части балки 6-я опора является 2-й от конца балки. Следовательно, применив для этого случая те же формулы (25) и (36),



Черт. 14.

с заменой  $\delta_1$  и  $\delta_1'$ , соответственно на  $\delta_7$  и  $\delta_7'$ , будем иметь:

$$\left. \begin{aligned} \text{прав. } \delta_6 &= (1 - \alpha) \cdot \delta_7 + l \cdot \delta_7' \\ \text{прав. } \delta_6' &= \frac{3\alpha}{l} \delta_7 + \delta_7' \end{aligned} \right\} \dots (51)$$



Черт. 15.

Приравняв друг другу соответственно прогибы  $\delta_6$  и углы наклона  $\delta_6'$  в точке приложения силы  $X$ , выраженные формулами (50) и (51) отдельно для левой и для правой частей балки, мы получим два уравнения с неизвестными  $\delta_1, \delta_1', \delta_7$  и  $\delta_7'$ :

$$\left. \begin{aligned} a \cdot \delta_1 + a_1 \cdot l \cdot \delta_1' &= (1 - \alpha) \cdot \delta_7 + l \cdot \delta_7' \dots \dots \dots \\ - \frac{3\alpha}{l} \cdot d \cdot \delta_1 + d_1 \cdot \delta_1' &= - \frac{3\alpha}{l} \cdot \delta_7 + \delta_7' \dots \dots \dots \end{aligned} \right\} \dots \dots \dots (52)$$

Исключив величину  $\delta_7'$ , мы получим для осадки  $\delta_7$  на седьмой опоре выражение:

$$\delta_7 = \delta_1 \cdot \frac{(a + 3\alpha \cdot d)}{1 + 2\alpha} + \delta_1' \cdot l \cdot \frac{a_1 - d_1}{1 + 2\alpha} \dots \dots \dots (53)$$

Найдя таким образом выражение для осадки  $\delta_7$  в функции от основных неизвестных  $\delta_1$  и  $\delta_1'$  и воспользовавшись формулами (25) для осадок на опорах от 1-й до 5-й, мы можем переписать первое из уравнений (49) в следующей раскрытой форме:

$$\delta_1 \cdot \left\{ 5 - 146\alpha + 153\alpha^2 - 26\alpha^3 + \alpha^4 + \frac{(a + 3\alpha d)}{1 + 2\alpha} \right\} + \delta_1' \cdot l \cdot \left\{ 10 - 57\alpha + 19\alpha^2 - \alpha^3 + \frac{a_1 - d_1}{1 + 2\alpha} \right\} = - \frac{1}{k} \dots \dots \dots (54)$$

Второе из уравнений (49), после использования формул (25) для приведения его к виду уравнения с двумя основными неизвестными, сведется к нижеследующему:

$$\sum_{i=1}^{i=5} \delta_i \cdot r_i = \delta_1 \left\{ 20 - 349\alpha + 325\alpha^2 - 53\alpha^3 + 2\alpha^4 \right\} + \delta_1' \cdot l \left\{ 30 - 126\alpha + 39\alpha^2 - 2\alpha^3 \right\} = - \frac{1 \cdot l}{k} \dots \dots \dots (55)$$

Решив уравнения (54) и (55) относительно основных неизвестных  $\delta_1$  и  $\delta_1'$  и подставив их значения в формулы (25) и (26), мы получим все необходимые данные для построения линии прогибов нашей балки под действием нагрузки в виде единичной силы  $X$ . Значения постоянных коэффициентов в уравнении линии прогибов (29) в этом случае для всех пяти пролетов подсчитываются по формулам (30).

Величина  $\alpha_{XX}$ , входящая в выражение  $-\frac{1}{\alpha_{XX} + \frac{1}{k}}$  для постоянного коэффи-

циента, на который нужно множить ординаты линии прогибов для перехода к ординатам искомой инфлюэнтной линии, в этом случае, как и в случае, рассмотренном в предыдущем параграфе, имеет смысл ординаты линии прогибов в точке приложения силы  $X$  и, следовательно, из предыдущего решения нам уже известна.

Для тех же значений характеристики жесткости пути  $\alpha$ , которые приведены в § 1, мною подсчитаны значения ординат инфлюэнтных линий опорного давления на 6-й опоре шестипролетной неразрезной балки на упругих опорах. Величина ординат

и соответствующие табличные разности для интерполяции по  $\left(\frac{x}{l}\right)$  и по  $\alpha$  приведены

в помещенной ниже таблице IV, а общий вид полученных инфлюэнтных линий показан на черт. 16.

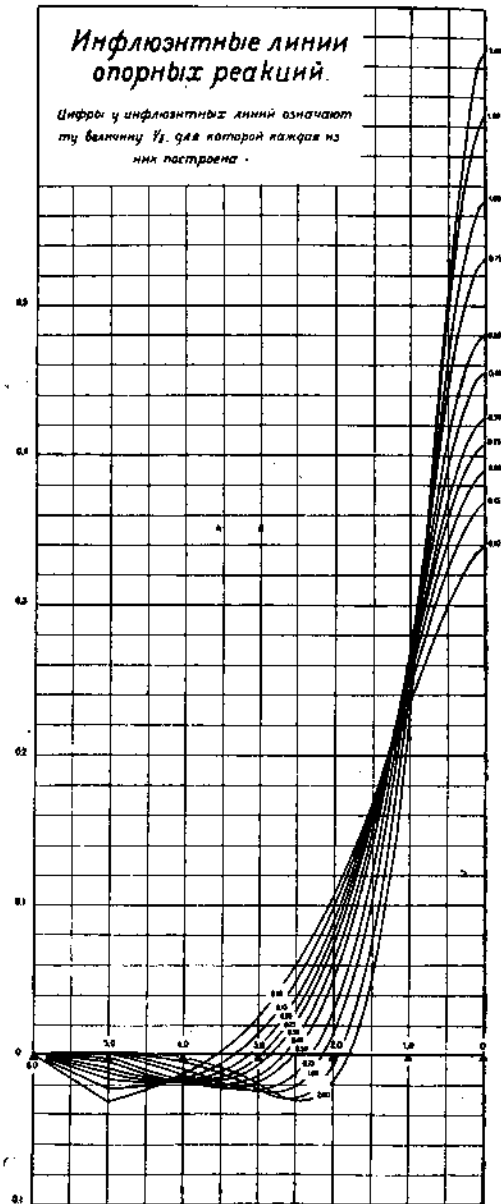
Недостаток времени не позволил коснуться в настоящей статье теоретического исследования вопроса о влиянии отдельных факторов, определяющих тип и состояние верхнего строения пути (как-то: профиль рельса, размеры шпал и т. п.) на величину напряжений в рельсах и под шпалами. Разработанный в на стоящей статье метод расчета неразрезных балок на упругих опорах, основной смысл которого сводится

к расчленению системы уравнений для определения лишних неизвестных на систему из двух уравнений с двумя, принятыми за основные, неизвестными  $\delta_1$  и  $\delta_1'$  [см. общие уравнения (15) и (16)] и на систему выражений, определяющих все остальные лишние неизвестные функции от основных величин  $\delta_1$  и  $\delta_1'$  [для случаев, рассмотренных в § 1—4 см. выражения (25) и (26)] независимо одно от другого, — этот метод может быть использован для расчета напряжений в рельсах, шпалах и под шпалами в самых разнообразных случаях, встречающихся в действительности. Влияние переменности расстояния между шпалами и неодинаковой подбивки шпал в расчете по изложенному методу усложнит все соответствующие уравнения и соотношения и увеличит объем арифметических выкладок. Тем не менее, расчет пути по этому методу сводит задачу об учете переменности факторов  $l$  и  $C$  (коэффициент постели шпалы) в плоскость сравнительно легко разрешимых задач. Расчет по общепринятому методу, путем решения основных уравнений Клапейрона, потребовал бы несравненно большего количества сложной вычислительной работы.

Изложенный метод, нужно думать, мог бы быть еще упрощен применением теории конечных разностей.

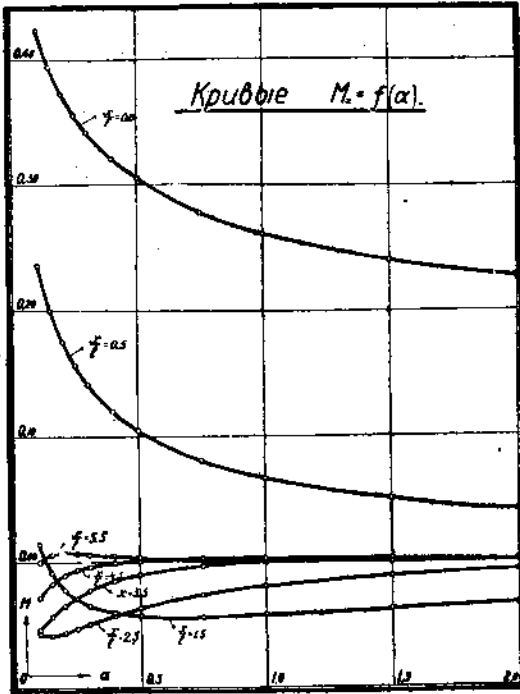
В заключение, в целях характеристики влияния коэффициента жесткости  $\alpha$  на величину расчетных моментов в рельсах и опорных давлений на шпалы, приводим кривые изменения величин  $M$  и  $X$  в функции от  $\alpha$ . (Черт. 17, 18 19 и 20). Порядок чертежей соответствует случаям, рассмотренным в §§ 1—4. Эти кривые наглядно показывают, что с увеличением коэффициента  $\alpha$  величина расчетных моментов, для которых решающими являются ординаты, соответствующие абсциссе  $\frac{x}{l} = 0$ , падает, а

величин давления опоры возрастает. Значение  $\alpha$  изменяется прямо пропорционально величине  $k$ . Следовательно, при увеличении коэффициента  $k$  при прочих равных условиях величина расчетных напряжений падает. Напряжение под постелью шпалы и величина осадки ее в действительности не дают простой линейной связи друг с другом, при чем по всем данным при возрастании нагрузки удельное оседание шпалы становится меньше. явления уменьшения действительных Путевого Испытательного Бюро НТК и изложенного выше в статье инж. П. С. Дьякова Надежное разрешение этого вопроса

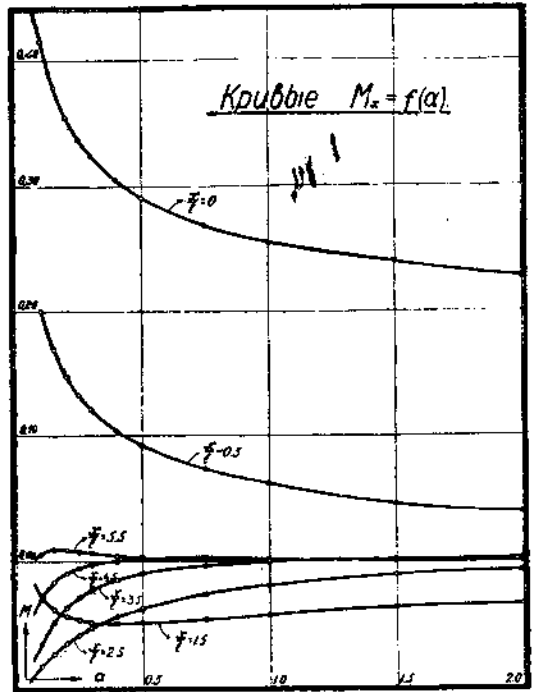


Черт. 16.

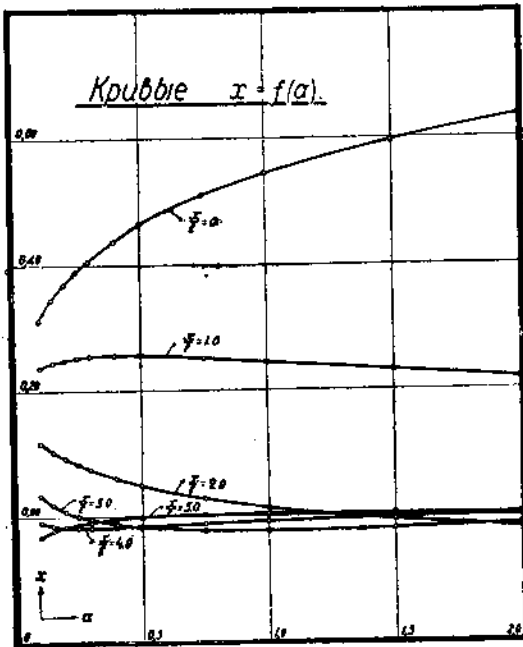
В этом, нужно думать, заключается разгадка напряжений в рельсах, отмеченного опытами, и изложенного выше в статье инж. П. С. Дьякова смогут дать лишь многократные исследования



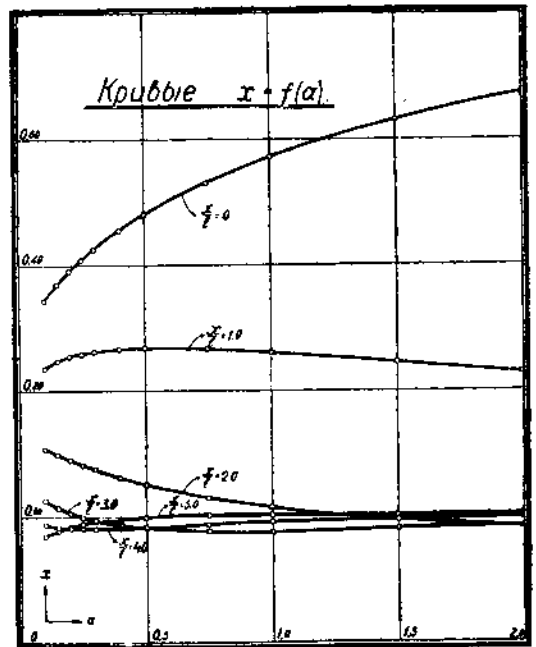
Черт. 17.



Черт. 18.



Черт. 19.



Черт. 20.

всех составляющих факторов работы верхнего строения пути одновременно, т.е. параллельное наблюдение напряжений в рельсах и балласте, осадок шпал, прогиба и углов наклона рельсов.

Таблицы к статье инж. В. В. Григорьева  
„Статический расчет рельсов“



Таблица I. Ординаты инфлюэнтных линий момента в среднем сечении сред

$\frac{x}{l}$	$\alpha=0,10$	Табличные разности для интерполяции.		$\alpha=0,15$	Табличные разности для интерполяции.		$\alpha=0,20$
		по $\frac{x}{l}$	по $\alpha$		по $\frac{x}{l}$	по $\alpha$	
0,0	+0,41521		-0,03639	+0,37891		-0,02361	+0,35520
0,1	+0,36666	-0,04855	-0,03626	+0,33040	-0,04841	-0,02550	+0,30690
0,2	+0,32103	-0,04563	-0,03585	+0,28518	-0,04522	-0,02321	+0,26197
0,3	+0,27830	-0,04273	-0,03517	+0,24313	-0,04205	-0,02271	+0,22042
0,4	+0,23849	-0,03981	-0,03423	+0,20426	-0,03837	-0,02201	+0,18225
0,5	+0,20159	-0,03690	-0,03302	+0,16857	-0,03569	-0,02110	+0,14747
0,6	+0,16758	-0,03401	-0,03154	+0,13604	-0,03253	-0,02001	+0,11603
0,7	+0,13636	-0,03122	-0,02982	+0,10651	-0,02950	-0,01874	+0,08780
0,8	+0,10781	-0,02855	-0,02790	+0,07991	-0,02663	-0,01731	+0,06260
0,9	+0,08180	-0,02601	-0,02579	+0,05601	-0,02390	-0,01576	+0,04025
1,0	+0,05822	-0,02358	-0,02354	+0,03468	-0,02133	-0,01411	+0,02057
1,1	+0,03695	-0,02127	-0,02117	+0,01578	-0,01890	-0,01239	+0,00339
1,2	+0,01787	-0,01908	-0,01873	+0,00086	-0,01664	-0,01062	-0,01148
1,3	+0,00085	-0,01702	-0,01873	-0,00086	-0,01452	-0,00882	-0,02420
1,4	-0,01423	-0,01508	-0,01623	-0,01538	-0,01254	-0,00704	-0,03496
1,5	-0,02749	-0,01326	-0,01369	-0,02792	-0,01074	-0,00527	-0,04392
1,6	-0,03904	-0,01155	-0,01117	-0,03866	-0,00906	-0,00357	-0,05127
1,7	-0,04900	-0,00996	-0,00868	-0,04772	-0,00752	-0,00189	-0,05713
1,8	-0,05746	-0,00846	-0,00624	-0,05524	-0,00609	-0,00030	-0,06163
1,9	-0,06454	-0,00708	-0,00387	-0,06133	-0,00478	+0,00122	-0,06489
2,0	-0,07033	-0,00579	+0,00157	-0,06611	-0,00358	+0,00265	-0,06704
2,1	-0,07494	-0,00461	+0,00064	-0,06969	-0,00250	+0,00400	-0,06819
2,2	-0,07848	-0,00354	+0,00275	-0,07219	-0,00154	+0,00525	-0,06848
2,3	-0,08105	-0,00257	+0,00475	-0,07373	-0,00070	+0,00640	-0,06803
2,4	-0,08275	-0,00170	+0,00662	-0,07443	+0,00003	+0,00744	-0,06696
2,5	-0,08369	-0,00095	+0,00835	-0,07440	+0,00065	+0,00836	-0,06539
2,6	-0,08397	-0,00027	+0,00995	-0,07375	+0,00115	+0,00915	-0,06345
2,7	-0,08365	+0,00032	+0,01137	-0,07260	+0,00159	+0,00983	-0,06118
		+0,00087	+0,01264	-0,07101	+0,00199		

ного пролета одиннадцати-пролетной неразрезной балки на равноудаленных опорах.

Табличные разности для интерполяции.		$\alpha=0,25$	Табличные разности для интерполяции.		$\alpha=0,30$	Табличные разности для интерполяции.		$\alpha=0,40$
по $\frac{x}{l}$	по $\alpha$		по $\frac{x}{l}$	по $\alpha$		по $\frac{x}{l}$	по $\alpha$	
-0,04830	-0,01709	+0,33812	-0,04823	-0,01317	+0,32494	-0,04816	-0,01937	+0,30558
-0,04993	-0,01701	+0,28989	-0,04469	-0,01311	+0,27678	-0,04449	-0,01926	+0,25752
-0,04155	-0,01677	+0,24520	-0,04115	-0,01291	+0,23229	-0,04082	-0,01895	+0,21334
-0,03817	-0,01637	+0,20405	-0,03761	-0,01258	+0,19147	-0,03714	-0,01841	+0,17306
-0,03478	-0,01581	+0,16544	-0,03407	-0,01211	+0,15433	-0,03347	-0,01768	+0,13655
-0,03144	-0,01509	+0,13237	-0,03055	-0,01152	+0,12085	-0,02984	-0,01673	+0,10413
-0,02823	-0,01421	+0,10182	-0,02722	-0,01080	+0,09102	-0,02638	-0,01556	+0,07546
-0,02520	-0,01320	+0,07460	-0,02408	-0,00996	+0,06464	-0,02314	-0,01422	+0,05042
-0,02235	-0,01208	+0,05052	-0,02113	-0,00902	+0,04150	-0,02012	-0,01274	+0,02876
-0,01968	-0,01086	+0,02939	-0,01838	-0,00801	+0,02138	-0,01732	-0,01114	+0,01024
-0,01718	-0,00956	+0,01101	-0,01584	-0,00695	+0,00406	-0,01473	-0,00946	-0,00540
-0,01487	-0,00822	-0,00483	-0,01349	-0,00584	-0,01067	-0,01237	-0,00773	-0,01840
-0,01272	-0,00684	-0,01332	-0,01133	-0,00472	-0,02304	-0,01022	-0,00597	-0,02901
-0,01076	-0,00545	-0,02965	-0,00939	-0,00361	-0,03326	-0,00828	-0,00423	-0,03749
-0,00896	-0,00408	-0,03904	-0,00763	-0,00250	-0,04154	-0,00657	-0,00255	-0,04409
-0,00735	-0,00274	-0,04667	-0,00606	-0,00144	-0,04811	-0,00505	-0,00094	-0,04905
-0,00586	-0,00146	-0,05273	-0,00464	-0,00043	-0,05316	-0,00369	+0,00056	-0,05260
-0,00450	-0,00024	-0,05737	-0,00334	+0,00052	-0,05685	-0,00245	+0,00195	-0,05490
-0,00326	+0,00092	-0,06071	-0,00217	+0,00141	-0,05930	-0,00135	+0,00322	-0,05608
-0,00215	+0,00201	-0,06238	-0,00113	+0,00223	-0,06065	-0,00038	+0,00438	-0,05627
-0,00115	+0,00303	-0,06401	-0,00022	+0,00298	-0,06103	+0,00047	+0,00542	-0,05561
-0,00029	+0,00396	-0,06423	+0,00057	+0,00367	-0,06056	+0,00118	+0,00634	-0,05422
+0,00045	+0,00482	-0,06366	+0,00122	+0,00428	-0,05938	+0,00176	+0,00715	-0,05223
+0,00107	+0,00559	-0,06244	+0,00174	+0,00482	-0,05762	+0,00221	+0,00783	-0,04979
+0,00157	+0,00626	-0,06070	+0,00215	+0,00529	-0,05541	+0,00253	+0,00839	-0,04702
+0,00194	+0,00684	-0,05850	+0,00243	+0,00567	-0,05288	+0,00273	+0,00883	-0,04406
+0,00227	+0,00733	-0,05612	+0,00266	+0,00597	-0,05015	+0,00288	+0,00914	-0,04101
+0,00254	+0,00772	-0,05346	+0,00284	+0,00619	-0,04727	+0,00301	+0,00935	-0,03792

$\frac{x}{l}$	$x=0,10$	Табличные разности для интерполяции.		$x=0,15$	Табличные разности для интерполяции.		$x=0,20$
		по $\frac{x}{l}$	по $x$		по $\frac{x}{l}$	по $x$	
2,8	-0,08278		+0,01376	-0,06902	+0,01038		-0,05864
		+0,00137			+0,00232		
2,9	-0,08141		+0,01471	-0,06670	+0,01084		-0,05586
		+0,00181			+0,00262		
3,0	-0,07960		+0,01552	-0,06408	+0,01118		-0,05290
		+0,00219			+0,00287		
3,1	-0,07741		+0,01620	-0,06121	+0,01142		-0,04979
		+0,00253			+0,00305		
3,2	-0,07488		+0,01672	-0,05816	+0,01156		-0,04660
		+0,00280			+0,00319		
3,3	-0,07208		+0,01711	-0,05497	+0,01162		-0,04335
		+0,00302			+0,00329		
3,4	-0,06906		+0,01738	-0,05168	+0,01158		-0,04010
		+0,00319			+0,00332		
3,5	-0,06587		+0,01751	-0,04836	+0,01146		-0,03690
		+0,00332			+0,00332		
3,6	-0,06255		+0,01751	-0,04504	+0,01127		-0,03377
		+0,00341			+0,00329		
3,7	-0,05914		+0,01739	-0,04175	+0,01101		-0,03074
		+0,00350			+0,00328		
3,8	-0,05564		+0,01717	-0,03847	+0,01067		-0,02780
		+0,00356			+0,00324		
3,9	-0,05208		+0,01685	-0,03523	+0,01028		-0,02495
		+0,00362			+0,00320		
4,0	-0,04846		+0,01643	-0,03203	+0,00983		-0,02220
		+0,00366			+0,00316		
4,1	-0,04480		+0,01593	-0,02887	+0,00933		-0,01954
		+0,00369			+0,00310		
4,2	-0,04111		+0,01534	-0,02577	+0,00879		-0,01698
		+0,00370			+0,00305		
4,3	-0,03741		+0,01469	-0,02272	+0,00819		-0,01453
		+0,00370			+0,00297		
4,4	-0,03371		+0,01396	-0,01975	+0,00758		-0,01217
		+0,00367			+0,00290		
4,5	-0,03004		+0,01319	-0,01685	+0,00693		-0,00991
		+0,00365			+0,00282		
4,6	-0,02639		+0,01236	-0,01403	+0,00627		-0,00776
		+0,00362			+0,00275		
4,7	-0,02277		+0,01149	-0,01128	+0,00558		-0,00570
		+0,00359			+0,00269		
4,8	-0,01918		+0,01059	-0,00859	+0,00487		-0,00372
		+0,00357			+0,00262		
4,9	-0,01561		+0,00964	-0,00597	+0,00415		-0,00182
		+0,00355			+0,00258		
5,0	-0,01206		+0,00867	-0,00339	+0,00341		-0,00002
		+0,00353			-0,00254		
5,1	-0,00853		+0,00768	-0,00085	+0,00266		-0,00181
		+0,00352			-0,00250		
5,2	-0,00501		+0,00666	+0,00165	+0,00191		-0,00356
		+0,00351			-0,00248		
5,3	-0,00150		+0,00563	+0,00413	+0,00115		-0,00528
		+0,00350			-0,00247		
5,4	+0,00200		+0,00460	+0,00660	+0,00038		-0,00698
		+0,00350			-0,00245		
5,5	+0,00550		+0,00355	+0,00905	-0,00039		-0,00866

Примечание. В пределах пролета от 5,51 до 6,51 ординаты инфлюэнтных линий

Табличные разности для интерполяции.		$x=0,25$	Табличные разности для интерполяции.		$x=0,30$	Табличные разности для интерполяции.		$x=0,40$
по $\frac{x}{l}$	по $x$		по $\frac{x}{l}$	по $x$		по $\frac{x}{l}$	по $x$	
+0,00278	+0,00802	-0,05062	+0,00299	+0,00636	-0,04426	+0,00308	+0,00943	-0,03483
+0,00296	+0,00823	-0,04473	+0,00310	+0,00645	-0,04118	+0,00312	+0,00943	-0,03175
+0,00311	+0,00837	-0,04453	+0,00316	+0,00647	-0,03806	+0,00314	+0,00934	-0,02872
+0,00319	+0,00842	-0,04137	+0,00319	+0,00645	-0,03492	+0,00311	+0,00917	-0,02575
+0,00325	+0,00842	-0,03818	+0,00318	+0,00637	-0,03181	+0,00305	+0,00893	-0,02288
+0,00325	+0,00835	-0,03500	+0,00311	+0,00624	-0,02876	+0,00295	+0,00863	-0,02013
+0,00320	+0,00821	-0,03189	+0,00302	+0,00608	-0,02581	+0,00281	+0,00828	-0,01753
+0,00313	+0,00803	-0,02887	+0,00289	+0,00588	-0,02299	+0,00266	+0,00789	-0,01510
+0,00303	+0,00779	-0,02598	+0,00275	+0,00564	-0,02034	+0,00249	+0,00747	-0,01287
+0,00294	+0,00751	-0,02323	+0,00262	+0,00538	-0,01785	+0,00233	+0,00701	-0,01084
+0,00285	+0,00719	-0,02061	+0,00249	+0,00509	-0,01552	+0,00218	+0,00654	-0,00898
+0,00275	+0,00683	-0,01812	+0,00236	+0,00478	-0,01334	+0,00203	+0,00605	-0,00729
+0,00266	+0,00644	-0,01576	+0,00223	+0,00445	-0,01131	+0,00189	+0,00554	-0,00577
+0,00256	+0,00601	-0,01353	+0,00212	+0,00411	-0,00942	+0,00175	+0,00502	-0,00440
+0,00248	+0,00557	-0,01141	+0,00199	+0,00374	-0,00767	+0,00163	+0,00449	-0,00318
+0,00236	+0,00511	-0,00942	+0,00187	+0,00338	-0,00604	+0,00150	+0,00396	-0,00208
+0,00226	+0,00462	-0,00755	+0,00176	+0,00301	-0,00454	+0,00138	+0,00343	-0,00111
+0,00215	+0,00412	-0,00579	+0,00165	+0,00263	-0,00316	+0,00126	+0,00291	-0,00025
+0,00206	+0,00362	-0,00414	+0,00155	+0,00224	-0,00190	+0,00117	+0,00240	+0,00050
+0,00198	+0,00311	-0,00259	+0,00146	+0,00186	-0,00073	+0,00108	+0,00189	+0,00116
+0,00190	+0,00259	-0,00113	+0,00138	+0,00148	+0,00035	+0,00099	+0,00139	+0,00174
+0,00184	+0,00207	+0,00025	+0,00131	+0,00109	+0,00134	+0,00093	+0,00090	+0,00224
+0,00179	+0,00154	+0,00156	+0,00125	+0,00071	+0,00227	+0,00087	+0,00041	+0,00268
+0,00175	+0,00100	+0,00281	+0,00121	+0,00033	+0,00314	+0,00083	-0,00007	+0,00307
+0,00172	+0,00046	+0,00402	+0,00118	-0,00005	+0,00397	+0,00079	-0,00055	+0,00342
+0,00170	-0,00008	+0,00520	+0,00116	-0,00044	+0,00476	+0,00077	-0,00102	+0,00374
+0,00168	-0,00062	+0,00636	+0,00114	-0,00083	+0,00553	+0,00076	-0,00149	+0,00404
	-0,00116	+0,00750		-0,00121	+0,00629		-0,00197	+0,00432

следует подсчитывать по закону прямой (к виду на крайней опоре, соответственно черт. 9).

$\frac{x}{l}$	$\alpha = 0,40$	Табличные разности для интерполяции		$\alpha = 0,50$	Табличные разности для интерполяции		$\alpha = 0,75$
		по $\frac{x}{l}$	по $\alpha$		по $\frac{x}{l}$	по $\alpha$	
0,0	+0,30558		-0,01386	+0,29172	-0,02270		+0,26902
0,1	+0,25752	-0,04805	-0,01378	+0,24374	-0,04797	-0,02255	+0,22119
0,2	+0,21334	-0,04418	-0,01352	+0,19982	-0,04392	-0,02210	+0,17772
0,3	+0,17306	-0,04028	-0,01312	+0,15994	-0,03988	-0,02133	+0,13861
0,4	+0,13665	-0,03641	-0,01253	+0,12412	-0,03582	-0,02028	+0,10384
0,5	+0,10413	-0,03252	-0,01179	+0,09235	-0,03177	-0,01892	+0,07343
0,6	+0,07546	-0,02867	-0,01088	+0,06458	-0,02777	-0,01727	+0,04731
0,7	+0,05042	-0,02504	-0,00983	+0,04059	-0,02399	-0,01536	+0,02523
0,8	+0,02876	-0,02166	-0,00867	+0,02009	-0,02050	-0,01326	+0,00683
0,9	+0,01024	-0,01852	-0,00743	+0,00281	-0,01728	-0,01102	+0,00821
1,0	-0,00540	-0,01564	-0,00612	-0,01152	-0,01433	-0,00869	-0,02021
1,1	-0,01840	-0,01300	-0,00480	-0,02320	-0,01168	-0,00632	-0,02952
1,2	-0,02901	-0,01061	-0,00347	-0,03248	-0,00928	-0,00398	-0,03646
1,3	-0,03749	-0,00848	-0,00216	-0,03965	-0,00717	-0,00170	-0,04135
1,4	-0,04409	-0,00660	-0,00089	-0,04498	-0,00533	+0,00044	-0,04454
1,5	-0,04905	-0,00496	+0,00028	-0,04876	-0,00378	+0,00242	-0,04634
1,6	-0,05260	-0,00355	+0,00136	-0,05124	-0,00248	+0,00417	-0,04707
1,7	-0,05490	-0,00230	+0,00234	-0,05256	-0,00132	+0,00570	-0,04686
1,8	-0,05608	-0,00118	+0,00321	-0,05287	-0,00031	+0,00702	-0,04585
1,9	-0,05627	-0,00019	+0,00399	-0,05228	+0,00059	+0,00812	-0,04416
2,0	-0,05561	+0,00066	+0,00466	-0,05095	+0,00133	+0,00904	-0,04191
2,1	-0,05422	+0,00139	+0,00524	-0,04898	+0,00197	+0,00976	-0,03922
2,2	-0,05223	+0,00199	+0,00571	-0,04652	+0,00246	+0,01031	-0,03621
2,3	-0,04979	+0,00244	+0,00610	-0,04369	+0,00283	+0,01069	-0,03300
2,4	-0,04702	+0,00277	+0,00639	-0,04063	+0,00306	+0,01090	-0,02973
2,5	-0,04406	+0,00297	+0,00658	-0,03747	+0,00316	+0,01097	-0,02649
2,6	-0,04101	+0,00305	+0,00669	-0,03432	+0,00315	+0,01090	-0,02342
2,7	-0,03792	+0,00309	+0,00671	-0,03121	+0,00311	+0,01070	-0,02051
2,8	-0,03483	+0,00308	+0,00667	-0,02816	+0,00305	+0,01038	-0,01778
		+0,00308			+0,00296		

Табличные разности для интерполяции		$\alpha = 1,00$	Табличные разности для интерполяции		$\alpha = 1,50$	Табличные разности для интерполяции		$\alpha = 2,00$
по $\frac{x}{l}$	по $x$		по $\frac{x}{l}$	по $x$		по $\frac{x}{l}$	по $x$	
-0,04783	-0,01425	+0,25476	-0,04771	-0,01763	+0,23713	-0,04757	-0,01085	+0,22628
-0,04347	-0,01414	+0,20705	-0,04316	-0,01749	+0,18956	-0,04272	-0,01075	+0,17881
-0,03911	-0,01383	+0,16389	-0,03858	-0,01705	+0,14684	-0,03785	-0,01045	+0,13639
-0,03477	-0,01330	+0,12531	-0,03402	-0,01632	+0,10899	-0,03300	-0,00997	+0,09902
-0,03041	-0,01255	+0,09129	-0,02946	-0,01530	+0,07599	-0,02815	-0,00928	+0,06671
-0,02612	-0,01160	+0,06183	-0,02495	-0,01399	+0,04784	-0,02336	-0,00839	+0,03945
-0,02208	-0,01043	+0,03688	-0,02076	-0,01240	+0,02448	-0,01893	-0,00731	+0,01717
-0,01840	-0,00911	+0,01612	-0,01693	-0,01057	+0,00555	-0,01494	-0,00608	-0,00053
-0,01504	-0,00764	-0,00081	-0,01348	-0,00858	-0,00939	-0,01137	-0,00474	-0,01413
-0,01200	-0,00608	-0,01429	-0,01040	-0,00657	-0,02076	-0,00824	-0,00333	-0,02409
-0,00931	-0,00448	-0,02469	-0,00769	-0,00431	-0,02900	-0,00553	-0,00189	-0,03089
-0,00694	-0,00286	-0,03238	-0,00535	-0,00215	-0,03453	-0,00326	-0,00048	-0,03501
-0,00489	-0,00127	-0,03773	-0,00338	-0,00006	-0,03779	-0,00142	-0,00088	-0,03691
-0,00319	+0,00024	-0,04111	-0,00178	+0,00190	-0,03921	-0,00000	+0,00213	-0,03708
-0,00180	+0,00165	-0,04289	-0,00056	+0,00368	-0,03921	+0,00098	+0,00324	-0,03597
-0,00073	+0,00290	-0,04345	+0,00035	+0,00521	-0,03824	+0,00159	+0,00416	-0,03408
+0,00021	+0,00397	-0,04310	+0,00108	+0,00645	-0,03655	+0,00205	+0,00485	-0,03180
+0,00101	+0,00484	-0,04202	+0,00173	+0,00742	-0,03460	+0,00242	+0,00534	-0,02926
+0,00169	+0,00556	-0,04029	+0,00224	+0,00811	-0,03218	+0,00272	+0,00565	-0,02653
+0,00225	+0,00611	-0,03805	+0,00267	+0,00859	-0,02946	+0,00293	+0,00578	-0,02368
+0,00269	+0,00653	-0,03538	+0,00296	+0,00885	-0,02653	+0,00304	+0,00577	-0,02076
+0,00301	+0,00680	-0,03242	+0,00316	+0,00893	-0,02349	+0,00308	+0,00564	-0,01785
+0,00321	+0,00695	-0,02926	+0,00324	+0,00885	-0,02041	+0,00302	+0,00540	-0,01501
+0,00327	+0,00698	-0,02602	+0,00322	+0,00863	-0,01739	+0,00288	+0,00509	-0,01230
+0,00323	+0,00678	-0,01972	+0,00308	+0,00829	-0,01451	+0,00265	+0,00473	-0,00978
+0,00307	+0,00655	-0,01687	+0,00285	+0,00787	-0,01186	+0,00235	+0,00432	-0,00753
+0,00291	+0,00625	-0,01426	+0,00261	+0,00757	-0,00950	+0,00207	+0,00391	-0,00559
+0,00273	+0,00590	-0,01188	+0,00238	+0,00683	-0,00743	+0,00179	+0,00348	-0,00395
+0,00255			+0,00216	+0,00624	-0,00564	+0,00155	+0,00306	-0,00258

$\frac{x}{l}$	$x = 0,40$	Табличные разности для интерполяции		$x = 0,50$	Табличные разности для интерполяции		$x = 0,75$
		по $\frac{x}{l}$	по $\alpha$		по $\frac{x}{l}$	по $\alpha$	
2,9	-0,03175	+0,00303	+0,00655	-0,02520	+0,00286	+0,00997	-0,01523
3,0	-0,02872	+0,00297	+0,00638	-0,02234	+0,00274	+0,00948	-0,01286
3,1	-0,02575	+0,00287	+0,00615	-0,01960	+0,00261	+0,00893	-0,01067
3,2	-0,02288	+0,00275	+0,00589	-0,01699	+0,00245	+0,00832	-0,00867
3,3	-0,02013	+0,00260	+0,00559	-0,01454	+0,00227	+0,00769	-0,00685
3,4	-0,01753	+0,00243	+0,00526	-0,01227	+0,00209	+0,00704	-0,00523
3,5	-0,01510	+0,00223	+0,00492	-0,01018	+0,00187	+0,00638	-0,00380
3,6	-0,01287	+0,00203	+0,00456	-0,00831	+0,00168	+0,00574	-0,00257
3,7	-0,01084	+0,00185	+0,00421	-0,00663	+0,00149	+0,00511	-0,00152
3,8	-0,00898	+0,00169	+0,00384	-0,00514	+0,00132	+0,00450	-0,00064
3,9	-0,00729	+0,00152	+0,00347	-0,00382	+0,00116	+0,00391	+0,00009
4,0	-0,00577	+0,00137	+0,00311	-0,00266	+0,00100	+0,00334	+0,00068
4,1	-0,00440	+0,00122	+0,00274	-0,00166	+0,00087	+0,00281	+0,00115
4,2	-0,00318	+0,00110	+0,00239	-0,00079	+0,00074	+0,00229	+0,00150
4,3	-0,00208	+0,00097	+0,00203	-0,00005	+0,00063	+0,00181	+0,00176
4,4	-0,00111	+0,00086	+0,00169	+0,00058	+0,00053	+0,00136	+0,00194
4,5	-0,00025	+0,00075	+0,00136	+0,00111	+0,00044	+0,00095	+0,00206
4,6	+0,00050	+0,00066	+0,00105	+0,00155	+0,00035	+0,00057	+0,00212
4,7	+0,00116	+0,00058	+0,00074	+0,00190	+0,00029	+0,00023	+0,00213
4,8	+0,00174	+0,00050	+0,00045	+0,00219	+0,00023	-0,00009	+0,00210
4,9	+0,00224	+0,00044	+0,00018	+0,00242	+0,00017	-0,00039	+0,00203
5,0	+0,00268	+0,00039	-0,00009	+0,00259	+0,00013	-0,00066	+0,00193
5,1	+0,00307	+0,00035	-0,00035	+0,00272	+0,00009	-0,00091	+0,00181
5,2	+0,00342	+0,00032	-0,00061	+0,00281	+0,00007	-0,00115	+0,00165
5,3	+0,00374	+0,00030	-0,00086	+0,00288	+0,00004	-0,00138	+0,00150
5,4	+0,00404	+0,00028	-0,00112	+0,00292	+0,00004	-0,00158	+0,00134
5,5	+0,00432		-0,00136	+0,00296		-0,00180	+0,00116

Примечание. В пределах пролета от 5,5 l до 6,5 l ординаты дифлюэнтных линий

Табличные разности для интерполяции		$x = 1,00$	Табличные разности для интерполяции		$x = 1,50$	Табличные разности для интерполяции		$x = 2,00$
по $\frac{x}{T}$	по $x$		по $\frac{x}{T}$	по $x$		по $\frac{x}{T}$	по $x$	
+0,00237	+0,00551	-0,00972	+0,00194	+0,00563	-0,00409	+0,00131	+0,00245	-0,00164
+0,00219	+0,00508	-0,00778	+0,00173	+0,00500	-0,00278	+0,00109	+0,00221	-0,00057
+0,00200	+0,00462	-0,00605	+0,00153	+0,00436	-0,00169	+0,00091	+0,00156	+0,00013
+0,00132	+0,00415	-0,00452	+0,00135	+0,00374	-0,00078	+0,00073	+0,00144	+0,00066
+0,00162	+0,00368	-0,00317	+0,00115	+0,00312	-0,00005	+0,00059	+0,00109	+0,00104
+0,00143	+0,00321	-0,00202	+0,00099	+0,00256	+0,00054	+0,00045	+0,00077	+0,00131
+0,00123	+0,00277	-0,00103	+0,00081	+0,00202	+0,00099	+0,00034	+0,00049	+0,00148
+0,00105	+0,00235	-0,00022	+0,00067	+0,00155	+0,00133	+0,00024	+0,00025	+0,00158
+0,00088	+0,00197	+0,00045	+0,00052	+0,00112	+0,00157	+0,00015	+0,00005	+0,00162
+0,00073	+0,00161	+0,00097	+0,00040	+0,00075	+0,00172	+0,00008	-0,00011	+0,00161
+0,00059	+0,00128	+0,00137	+0,00029	+0,00043	+0,00180	+0,00002	-0,00024	+0,00156
+0,00047	+0,00098	+0,00166	+0,00019	+0,00016	+0,00182	-0,00005	-0,00035	+0,00147
+0,00035	+0,00070	+0,00185	+0,00011	-0,00008	+0,00177	-0,00008	-0,00041	+0,00136
+0,00026	+0,00046	+0,00196	+0,00004	-0,00027	+0,00169	-0,00012	-0,00047	+0,00122
+0,00018	+0,00024	+0,00200	-0,00001	-0,00043	+0,00157	-0,00013	-0,00049	+0,00108
+0,00012	+0,00005	+0,00199	-0,00005	-0,00055	+0,00144	-0,00014	-0,00051	+0,00093
+0,00006	-0,00011	+0,00194	-0,00008	-0,00064	+0,00130	-0,00014	-0,00051	+0,00079
+0,00001	-0,00026	+0,00186	-0,00010	-0,00070	+0,00116	-0,00014	-0,00050	+0,00066
-0,00003	-0,00037	+0,00176	-0,00012	-0,00074	+0,00102	-0,00014	-0,00048	+0,00054
-0,00007	-0,00046	+0,00164	-0,00014	-0,00076	+0,00088	-0,00014	-0,00044	+0,00044
-0,00010	-0,00053	+0,00150	-0,00016	-0,00076	+0,00074	-0,00013	-0,00040	+0,00034
-0,00012	-0,00059	+0,00134	-0,00017	-0,00073	+0,00061	-0,00013	-0,00036	+0,00025
-0,00015	-0,00064	+0,00117	-0,00017	-0,00069	+0,00048	-0,00013	0,00031	+0,00017
-0,00016	-0,00066	+0,00100	-0,00019	-0,00065	+0,00035	-0,00013	-0,00025	+0,00010
-0,00016	-0,00069	+0,00081	-0,00019	-0,00059	+0,00022	-0,00013	-0,00020	+0,00002
-0,00018	-0,00072	+0,00062	-0,00020	-0,00053	+0,00009	-0,00012	-0,00014	+0,00005
	-0,00073	+0,00042		-0,00039	+0,00003		-0,00008	+0,00011

следует подсчитывать по закону прямой (к нулю на крайней опоре, соответственно черт. 9).



Таблица II. Ординаты инфлюэнтных линий момента в среднем сечении

$\frac{x}{l}$	$\alpha = 0,10$	Табличные разности для интерполяции.		$\alpha = 0,15$	Табличные разности для интерполяции.		$\alpha = 0,20$
		по $\frac{x}{l}$	по $\alpha$		по $\frac{x}{l}$	по $\alpha$	
0,0	+0,42338		-0,02897	+0,39441		-0,02156	+0,37284
0,1	+0,38160	-0,04178	-0,03115	+0,35045	-0,04396	-0,02283	+0,32762
0,2	+0,34184	-0,03976	-0,03292	+0,30892	-0,04153	-0,02379	+0,28513
0,3	+0,30415	-0,03769	-0,03428	+0,26987	-0,03905	-0,02443	+0,24544
0,4	+0,26860	-0,03555	-0,03521	+0,23339	-0,03648	-0,02476	+0,20863
0,5	+0,23526	-0,03334	-0,03572	+0,19954	-0,03385	-0,02480	+0,17475
0,6	+0,20417	-0,03109	-0,03580	+0,16835	-0,03119	-0,02451	+0,14384
0,7	+0,17528	-0,02889	-0,03554	+0,13974	-0,02861	-0,02394	+0,11580
0,8	+0,14850	-0,02678	-0,03489	+0,11361	-0,02613	-0,02312	+0,09049
0,9	+0,12378	-0,02472	-0,03394	+0,08984	-0,02377	-0,02209	+0,06775
1,0	+0,10102	-0,02276	-0,03269	+0,06833	-0,02151	-0,02088	+0,04745
1,1	+0,08016	-0,02086	-0,03121	+0,04895	-0,01938	-0,01950	+0,02945
1,2	+0,06111	-0,01905	-0,02951	+0,03160	-0,01735	-0,01800	+0,01360
1,3	+0,04381	-0,01730	-0,02765	+0,01616	-0,01544	-0,01639	-0,00023
1,4	+0,02818	-0,01563	-0,02565	+0,00253	-0,01363	-0,01473	-0,01220
1,5	+0,01414	-0,01404	-0,02354	-0,00940	-0,01193	-0,01303	-0,02243
1,6	+0,00161	-0,01253	-0,02138	-0,01977	-0,01037	-0,01130	-0,03107
1,7	-0,00947	-0,01108	-0,01917	-0,02864	-0,00887	-0,00960	-0,03824
1,8	-0,01922	-0,00975	-0,01692	-0,03614	-0,00750	-0,00791	-0,04405
1,9	-0,02770	-0,00848	-0,01466	-0,04236	-0,00622	-0,00627	-0,04863
2,0	-0,03500	-0,00730	-0,01241	-0,04741	-0,00505	-0,00466	-0,05207
2,1	-0,04120	-0,00620	-0,01020	-0,05140	-0,00399	-0,00310	-0,05450
2,2	-0,04639	-0,00519	-0,00803	-0,05442	-0,00302	-0,00162	-0,05604
2,3	-0,05065	-0,00426	-0,00593	-0,05658	-0,00216	-0,00021	-0,05679
2,4	-0,05407	-0,00342	-0,00391	-0,05798	-0,00140	+0,00110	-0,05688
2,5	-0,05672	-0,00265	-0,00201	-0,05873	-0,00075	+0,00232	-0,05641
2,6	-0,05870	-0,00198	-0,00022	-0,05892	-0,00019	+0,00342	-0,05550
2,7	-0,06004	-0,00134	+0,00143	-0,05861	+0,00031	+0,00441	-0,05420
		-0,00078			+0,00077		

2-го пролета семипролетной неразрезной балки на равноупругих опорах.

Табличные разности для интерполяции.		$\alpha = 0,25$	Табличные разности для интерполяции.		$\alpha = 0,30$	Табличные разности для интерполяции.		$\alpha = 0,40$
по $\frac{x}{l}$	по $\alpha$		по $\frac{x}{l}$	по $\alpha$		по $\frac{x}{l}$	по $\alpha$	
-0,04523	-0,01696	+0,35590	-0,04603	-0,01378	+0,34212	-0,04659	-0,02132	+0,32080
-0,04249	-0,01775	+0,30987	-0,04306	-0,01434	+0,29553	-0,04340	-0,02198	+0,27355
-0,03969	-0,01832	+0,26681	-0,04000	-0,01468	+0,25213	-0,04014	-0,02231	+0,22982
-0,03681	-0,01863	+0,22681	-0,03689	-0,01482	+0,21199	-0,03683	-0,02234	+0,18965
-0,03388	-0,01871	+0,18992	-0,03370	-0,01476	+0,17516	-0,03345	-0,02205	+0,15311
-0,03091	-0,01853	+0,15622	-0,03050	-0,01451	+0,14171	-0,03005	-0,02146	+0,12025
-0,02804	-0,01812	+0,12572	-0,02742	-0,01466	+0,11166	-0,02680	-0,02058	+0,09108
-0,02531	-0,01750	+0,09830	-0,02450	-0,01344	+0,08486	-0,02374	-0,01943	+0,06543
-0,02274	-0,01669	+0,07380	-0,02176	-0,01268	+0,06112	-0,02088	-0,01807	+0,04305
-0,02030	-0,01571	+0,05204	-0,01920	-0,01180	+0,04024	-0,01819	-0,01652	+0,02372
-0,01800	-0,01461	+0,03284	-0,01678	-0,01079	+0,02205	-0,01571	-0,01483	+0,00722
-0,01585	-0,01339	+0,01606	-0,01454	-0,00972	+0,00634	-0,01342	-0,01304	-0,00670
-0,01383	-0,01208	+0,00152	-0,01248	-0,00860	-0,00708	-0,01132	-0,01119	-0,01827
-0,01197	-0,01073	-0,01096	-0,01058	-0,00744	-0,01840	-0,00941	-0,00930	-0,02770
-0,01023	-0,00934	-0,02154	-0,00884	-0,00627	-0,02781	-0,00768	-0,00743	-0,03524
-0,00864	-0,00795	-0,03038	-0,00727	-0,00511	-0,03550	-0,00616	-0,00563	-0,04112
-0,00717	-0,00658	-0,03765	-0,00583	-0,00400	-0,04165	-0,00475	-0,00390	-0,04555
-0,00581	-0,00524	-0,04348	-0,00452	-0,00292	-0,04640	-0,00348	-0,00228	-0,04868
-0,00458	-0,00395	-0,04800	-0,00331	-0,00188	-0,04988	-0,00233	-0,00075	-0,05063
-0,00344	-0,00268	-0,05131	-0,00225	-0,00090	-0,05221	-0,00132	+0,00066	-0,05155
-0,00243	-0,00149	-0,05356	-0,00129	+0,00003	-0,05353	-0,00043	+0,00197	-0,05156
-0,00154	-0,00035	-0,05485	-0,00046	+0,00089	-0,05396	+0,00033	+0,00316	-0,05080
-0,00075	+0,00073	-0,05531	+0,00024	+0,00168	-0,05363	+0,00096	+0,00424	-0,04939
-0,00009	+0,00172	-0,05507	+0,00082	+0,00240	-0,05267	+0,00147	+0,00519	-0,04748
+0,00047	+0,00263	-0,05425	+0,00128	+0,00305	-0,05120	-0,00185	+0,00601	-0,04519
+0,00091	+0,00344	-0,05297	+0,00163	+0,00361	-0,04935	+0,00211	+0,00670	-0,04265
+0,00130	+0,00416	-0,05134	+0,00193	+0,00410	-0,04724	+0,00233	+0,00726	-0,03998
+0,00164	+0,00479	-0,04941	+0,00217	+0,00450	-0,04491	+0,00250	+0,00768	-0,03723

$\frac{x}{l}$	$\alpha = 0,10$		$\alpha = 0,15$		$\alpha = 0,20$	
	Табличные разности для интерполяции.		Табличные разности для интерполяции.		Табличные разности для интерполяции.	
	по $\frac{x}{l}$	по $x$	по $\frac{x}{l}$	по $x$	по $\frac{x}{l}$	по $x$
2,8	-0,06082	+0,00298	-0,05784	+0,00528	+0,00117	-0,05256
2,9	-0,06106	+0,00439	-0,05667	+0,00605	+0,00151	-0,05062
3,0	-0,06083	+0,00567	-0,05516	+0,00673	+0,00182	-0,04843
3,1	-0,06017	+0,00683	-0,05334	+0,00730	+0,00208	-0,04604
3,2	-0,05914	+0,00788	-0,05126	+0,00775	+0,00227	-0,04351
3,3	-0,05778	+0,00879	-0,04899	+0,00813	+0,00243	-0,04086
3,4	-0,05614	+0,00958	-0,04656	+0,00840	+0,00252	-0,03816
3,5	-0,05428	+0,01024	-0,04404	+0,00859	+0,00258	-0,03545
3,6	-0,05224	+0,01078	-0,04146	+0,00870	+0,00263	-0,03276
3,7	-0,05004	+0,01121	-0,03883	+0,00871	+0,00265	-0,03012
3,8	-0,04769	+0,01151	-0,03618	+0,00865	+0,00267	-0,02753
3,9	-0,04523	+0,01172	-0,03351	+0,00853	+0,00269	-0,02498
4,0	-0,04265	+0,01183	-0,03082	+0,00832	+0,00268	-0,02250
4,1	-0,03999	+0,01185	-0,02814	+0,00807	+0,00266	-0,02007
4,2	-0,03726	+0,01178	-0,02548	+0,00777	+0,00265	-0,01771
4,3	-0,03447	+0,01164	-0,02283	+0,00740	+0,00261	-0,01542
4,4	-0,03164	+0,01142	-0,02022	+0,00702	+0,00257	-0,01320
4,5	-0,02880	+0,01115	-0,01765	+0,00658	+0,00252	-0,01106
4,6	-0,02595	+0,01082	-0,01513	+0,00612	+0,00247	-0,00901
4,7	-0,02310	+0,01044	-0,01266	+0,00563	+0,00243	-0,00703
4,8	-0,02025	+0,01002	-0,01023	+0,00511	+0,00239	-0,00512
4,9	-0,01740	+0,00956	-0,00784	+0,00457	+0,00235	-0,00327
5,0	-0,01455	+0,00906	-0,00549	+0,00402	+0,00233	-0,00147
5,1	-0,01170	+0,00854	-0,00316	+0,00345	+0,00231	+0,00029
5,2	-0,00884	+0,00799	-0,00085	+0,00286	+0,00229	+0,00201
5,3	-0,00599	+0,00743	+0,00144	+0,00227	+0,00228	+0,00371
5,4	-0,00313	+0,00685	+0,00372	+0,00167	+0,00228	+0,00539
5,5	-0,00028	+0,00628	+0,00600	+0,00107	+0,00228	+0,00706

Примечание: В пределах пролета от 5,5l до 6,5l ординаты инфлюэнтных черт. 12).

Табличные разности для интерполяции.			Табличные разности для интерполяции.			Табличные разности для интерполяции.		
по $\frac{x}{l}$		$\alpha = 0,25$	по $\frac{x}{l}$		$\alpha = 0,30$	по $\frac{x}{l}$		$\alpha = 0,40$
по $\alpha$	по $\alpha$		по $\alpha$	по $\alpha$				
+0,00194	+0,00532	-0,04724	+0,00238	+0,00483	-0,04241	+0,00263	+0,00799	-0,03442
+0,00219	+0,00576	-0,04486	+0,00254	+0,00508	-0,03978	+0,00273	+0,00819	-0,03159
+0,00239	+0,00611	-0,04232	+0,00267	+0,00527	-0,03705	+0,00278	+0,00828	-0,02877
+0,00253	+0,00639	-0,03965	+0,00274	+0,00539	-0,03427	+0,00280	+0,00829	-0,02598
+0,00265	+0,00660	-0,03691	+0,00277	+0,00544	-0,04147	+0,00279	+0,00822	-0,02325
+0,00270	+0,00672	-0,03414	+0,00276	+0,00546	-0,02868	+0,00272	+0,00806	-0,02062
+0,00271	+0,00678	-0,03138	+0,00271	+0,00542	-0,02596	+0,00262	+0,00785	-0,01811
+0,00269	+0,00678	-0,02867	+0,00262	+0,00533	-0,02334	+0,00249	+0,00759	-0,01575
+0,00264	+0,00671	-0,02605	+0,00253	+0,00520	-0,02085	+0,00236	+0,00728	-0,01357
+0,00259	+0,00660	-0,02352	+0,00242	+0,00503	-0,01849	+0,00223	+0,00693	-0,01156
+0,00255	+0,00643	-0,02110	+0,00233	+0,00484	-0,01626	+0,00209	+0,00653	-9,00973
+0,00248	+0,00621	-0,01877	+0,00223	+0,00460	-0,01417	+0,00198	+0,00612	-0,00805
+0,00243	+0,00598	-0,01654	+0,00213	+0,00435	-0,01219	+0,00185	+0,00567	-0,00652
+0,00236	+0,00566	-0,01441	+0,00204	+0,00407	-0,01034	+0,00174	+0,00521	-0,00513
+0,00229	+0,00534	-0,01237	+0,00193	+0,00377	-0,00860	+0,00162	+0,00472	-0,00388
+0,00222	+0,00498	-0,01044	+0,00184	+0,00346	-0,00698	+0,00150	+0,00423	-0,00275
+0,00214	+0,00460	-0,00860	+0,00173	+0,00312	-0,00548	+0,00140	+0,00374	-0,00174
+0,00205	+0,00419	-0,00687	+0,00164	+0,00279	-0,00408	+0,00130	+0,00323	-0,00084
+0,00198	+0,00378	-0,00523	+0,00155	+0,00245	-0,00278	+0,00120	+0,00273	-0,00005
+0,00191	+0,00335	-0,00368	+0,00146	+0,00210	-0,00158	+0,00111	+0,00224	+0,00066
+0,00185	+0,00290	-0,00222	+0,00140	+0,00175	-0,00047	+0,00104	+0,00175	+0,00128
+0,00180	+0,0245	-0,00082	+0,00134	+0,00139	+0,00057	+0,00098	+0,00127	+0,00184
+0,00176	+0,00199	+0,00052	+0,00129	+0,00103	+0,00155	+0,00093	+0,00078	+0,00233
+0,00172	+0,00152	+0,00181	+0,00124	+0,00067	+0,00248	+0,00088	+0,00029	+0,00277
+0,00170	+0,00104	+0,00305	+0,00122	+0,00031	+0,00336	+0,00085	+0,00019	+0,00317
+0,00168	+0,00056	+0,00427	+0,00120	-0,00006	+0,00421	+0,00083	-0,00067	+0,00354
+0,00167	+0,00008	+0,00547	+0,00119	-0,00043	+0,00504	+0,00082	-0,00115	+0,00389
	-0,00040	+0,00666		-0,00080	+0,00586		-0,00163	+0,00423

линий следует подсчитывать по закону прямой (к нулю на крайней опоре, соответственно

$\frac{x}{l}$	$\alpha=0,40$	Табличные разности для интерполяции.		$\alpha=0,50$	Табличные разности для интерполяции.		$\alpha=0,75$
		по $\frac{x}{l}$	по $\alpha$		по $\frac{x}{l}$	по $\alpha$	
0,0	+0,32080		-0,01582	+0,30491	-0,04759	-0,02682	+0,27801
0,1	+0,27355	-0,04725	-0,01623	+0,25732	-0,04384	-0,02714	+0,23018
0,2	+0,22982	-0,04373	-0,01634	+0,21348	-0,04004	-0,02702	+0,18646
0,3	+0,18965	-0,04017	-0,01621	+0,17344	-0,03617	-0,02649	+0,14695
0,4	+0,15311	-0,03654	-0,01584	+0,13727	-0,03226	-0,02557	+0,11170
0,5	+0,12025	-0,03286	-0,01524	+0,10501	-0,02836	-0,02426	+0,08075
0,6	+0,09108	-0,02917	-0,01443	+0,07665	-0,02465	-0,02257	+0,05408
0,7	+0,06543	-0,02565	-0,01343	+0,05200	-0,02121	-0,02059	+0,03141
0,8	+0,04305	-0,02238	-0,01226	+0,03079	-0,01805	-0,01835	+0,01244
0,9	+0,02372	-0,01933	-0,01098	+0,01274	-0,01513	-0,01591	-0,00317
1,0	+0,00722	-0,01650	-0,00961	-0,00239	-0,01248	-0,01335	-0,01574
1,1	-0,00670	-0,01392	-0,00817	-0,01487	-0,01009	-0,01073	-0,02560
1,2	-0,01827	-0,01157	-0,00669	-0,02496	-0,00798	-0,00810	-0,03306
1,3	-0,02770	-0,00943	-0,00524	-0,03294	-0,00611	-0,00552	-0,03846
1,4	-0,03524	-0,00754	-0,00381	-0,03905	-0,00452	-0,00306	-0,04211
1,5	-0,04112	-0,00588	-0,00245	-0,04357	-0,00316	-0,00078	-0,04435
1,6	-0,04555	-0,00443	-0,00118	-0,04673	-0,00197	+0,00128	-0,04545
1,7	-0,04868	-0,00313	-0,00002	-0,04870	-0,00089	+0,00311	-0,04559
1,8	-0,05063	-0,00195	+0,00104	-0,04959	+0,00005	+0,00471	-0,04488
1,9	-0,05155	-0,00092	+0,00210	-0,04954	+0,00085	+0,00609	-0,04345
2,0	-0,05156	-0,00001	+0,00287	-0,04869	+0,00152	+0,00727	-0,04142
2,1	-0,05080	+0,00076	+0,00363	-0,04717	+0,00206	+0,00825	-0,03892
2,2	-0,04939	+0,00141	+0,00428	-0,04511	+0,00247	+0,00903	-0,03608
2,3	-0,04748	+0,00191	+0,00484	-0,04264	+0,00275	+0,00963	-0,03301
2,4	-0,04519	+0,00229	+0,00530	-0,03989	+0,00275	+0,01005	-0,02984
2,5	-0,04265	+0,00254	+0,00565	-0,03700	+0,00239	+0,01035	-0,02670
2,6	-0,03998	+0,00267	+0,00590	-0,03408	+0,00229	+0,01039	-0,02369
2,7	-0,03723	+0,00275	+0,00606	-0,03117	+0,00221	+0,01024	-0,02083
2,8	-0,03442	+0,00281	+0,00613	-0,02829	+0,00288	+0,01015	-0,01814

Табличные разности для интерполяции.		$\alpha=1,00$	Табличные разности для интерполяции.		$\alpha=1,50$	Табличные разности для интерполяции.		$\alpha=2,00$
по $\frac{x}{l}$	по $\alpha$		по $\frac{x}{l}$	по $\alpha$		по $\frac{x}{l}$	по $\alpha$	
-0,04791	-0,01705	+0,26104	-0,04792	-0,02085	+0,24018	-0,04777	-0,01249	+0,22770
-0,04372	-0,01706	+0,21312	-0,04346	-0,02070	+0,19242	-0,04295	-0,01231	+0,18011
-0,03951	-0,01680	+0,16966	-0,03898	-0,02019	+0,14947	-0,03813	-0,01170	+0,13777
-0,03525	-0,01627	+0,13068	-0,03446	-0,01934	+0,11134	-0,03328	-0,01129	+0,10005
-0,03095	-0,01548	+0,09622	-0,02991	-0,01816	+0,07806	-0,02841	-0,01047	+0,06759
-0,02667	-0,01444	+0,06630	-0,02541	-0,01666	+0,04965	-0,02362	-0,00945	+0,04020
-0,02267	-0,01318	+0,04090	-0,02119	-0,01487	+0,02603	-0,01916	-0,00825	+0,01779
-0,01897	-0,01170	+0,01971	-0,01736	-0,01284	+0,00687	-0,01515	-0,00690	-0,00003
-0,01561	-0,01009	+0,00235	-0,01389	-0,01063	-0,00828	-0,01157	-0,00545	-0,01373
-0,01257	-0,00837	-0,01154	-0,01078	-0,00831	-0,01985	-0,00841	-0,00393	-0,02378
-0,00986	-0,00658	-0,02232	-0,00806	-0,00594	-0,02826	-0,00570	-0,00240	-0,03066
-0,00746	-0,00478	-0,03038	-0,00568	-0,00358	-0,03396	-0,00340	-0,00088	-0,03484
-0,00540	-0,00300	-0,03606	-0,00370	-0,00130	-0,03736	-0,00154	+0,00056	-0,03680
-0,00365	-0,00130	-0,03976	-0,00206	+0,00086	-0,03890	-0,00011	+0,00189	-0,03701
-0,00224	+0,00029	-0,04182	-0,00081	+0,00281	-0,03901	+0,00089	+0,00347	-0,03594
-0,00110	+0,00172	-0,04263	+0,00012	+0,00451	-0,03812	+0,00151	+0,00404	-0,03408
-0,00014	+0,00294	-0,04251	+0,00090	+0,00590	-0,03661	+0,00199	+0,00479	-0,03182
+0,00071	+0,00398	-0,04161	+0,00157	+0,00699	-0,03462	+0,00238	+0,00532	-0,02930
+0,00143	+0,00484	-0,04004	+0,00211	+0,00780	-0,03224	+0,00269	+0,00565	-0,02659
+0,00203	+0,00552	-0,03793	+0,00256	+0,00838	-0,02955	+0,00290	+0,00581	-0,02374
+0,00250	+0,00605	-0,03537	+0,00288	+0,00872	-0,02665	+0,00303	+0,00582	-0,02083
+0,00284	+0,00643	-0,03249	+0,00309	+0,00887	-0,02362	+0,00306	+0,00570	-0,01792
+0,00307	+0,00668	-0,02940	+0,00320	+0,00884	-0,02056	+0,00303	+0,00548	-0,01508
+0,00317	+0,00681	-0,02620	+0,00318	+0,00867	-0,01753	+0,00288	+0,00517	-0,01236
+0,00314	+0,00682	-0,02302	+0,00305	+0,00837	-0,01465	+0,00266	+0,00481	-0,00984
+0,00301	+0,00673	-0,01997	+0,00283	+0,00798	-0,01199	+0,00237	+0,00440	-0,00759
+0,00286	+0,00655	-0,01714	+0,00261	+0,00752	-0,00962	+0,00207	+0,00398	-0,00564
+0,00269	+0,00630	-0,01453	+0,00238	+0,00698	-0,00755	+0,00181	+0,00356	-0,00399
	+0,00599	-0,01215		+0,00641	-0,00574		+0,00312	-0,00262

$\frac{x}{l}$	$\alpha=0,40$	Табличные разности для интерполяции.		$\alpha=0,50$	Табличные разности для интерполяции.		$\alpha=0,75$
		по $\frac{x}{l}$	по $\alpha$		по $\frac{x}{l}$	по $\alpha$	
2,9	-0,03159	+0,00283	+0,00613	-0,02546	+0,00283	+0,00985	-0,01561
3,0	-0,02877	+0,00282	+0,00606	-0,02271	+0,00275	+0,00946	-0,01325
3,1	-0,02598	+0,00279	+0,00593	-0,02005	+0,00266	+0,00899	-0,01106
3,2	-0,02325	+0,00273	+0,00574	-0,01751	+0,00254	+0,00845	-0,00906
3,3	-0,02062	+0,00263	+0,00552	-0,01510	+0,00241	+0,00787	-0,00723
3,4	-0,01811	+0,00251	+0,00525	-0,01286	+0,00224	+0,00727	-0,00559
3,5	-0,01575	+0,00236	+0,00496	-0,01079	+0,00207	+0,00665	-0,00414
3,6	-0,01357	+0,00218	+0,00465	-0,00892	+0,00187	+0,00604	-0,00288
3,7	-0,01156	+0,00201	+0,00433	-0,00723	+0,00169	+0,00542	-0,00181
3,8	-0,00973	+0,00183	+0,00400	-0,00573	+0,00150	+0,00483	-0,00090
3,9	-0,00805	+0,00168	+0,00366	-0,00439	+0,00134	+0,00424	-0,00015
4,0	-0,00652	+0,00153	+0,00331	-0,00321	+0,00118	+0,00368	+0,00047
4,1	-0,00513	+0,00139	+0,00296	-0,00217	+0,00104	+0,00313	+0,00096
4,2	-0,00388	+0,00125	+0,00261	-0,00127	+0,00090	+0,00271	+0,00134
4,3	-0,00275	+0,00113	+0,00226	-0,00049	+0,00078	+0,00211	+0,00162
4,4	-0,00174	+0,00101	+0,00191	+0,00017	+0,00066	+0,00165	+0,00182
4,5	-0,00084	+0,00090	+0,00159	+0,00074	+0,00057	+0,00121	+0,00195
4,6	-0,00005	+0,00080	+0,00127	+0,00122	+0,00048	+0,00081	+0,00203
4,7	+0,00086	+0,00071	+0,00096	+0,00162	+0,00040	+0,00044	+0,00206
4,8	+0,00128	+0,00062	+0,00066	+0,00194	+0,00032	+0,00011	+0,00205
4,9	+0,00184	+0,00056	+0,00037	+0,00221	+0,00027	-0,00021	+0,00200
5,0	+0,00233	+0,00049	+0,00009	+0,00242	+0,00021	-0,00051	+0,00191
5,1	+0,00277	+0,00044	-0,00019	+0,00258	+0,00016	-0,00078	+0,00180
5,2	+0,00317	+0,00040	-0,00046	+0,00271	+0,00013	-0,00104	+0,00167
5,3	+0,00354	+0,00037	-0,00073	+0,00281	+0,00010	-0,00129	+0,00152
5,4	+0,00389	+0,00035	-0,00099	+0,00290	+0,00009	-0,00154	+0,00136
5,5	+0,00423	+0,00034	-0,00125	+0,00298	+0,00008	-0,00178	+0,00120

Примечание. В пределах пролета от 5,51 до 6,51 ординаты инфлюэнтных линий сле-

Табличные разности для интерполяции.			Табличные разности для интерполяции.		$\alpha = 1,50$	Табличные разности для интерполяции.		$\alpha = 200$
$\alpha = 1,00$			$\alpha = 1,00$			$\alpha = 200$		
по $\frac{x}{l}$	по $x$		по $\frac{x}{l}$	по $x$	по $\frac{x}{l}$	по $x$	по $\frac{x}{l}$	по $x$
+0,00253			+0,00216			+0,00155		
	+0,00562	-0,00999		+0,00580	-0,00419		+0,00269	-0,00150
+0,00236			+0,00195			+0,00132		
	+0,00521	-0,00804		+0,00517	-0,00287		+0,00228	-0,00059
+0,00219			+0,00175			+0,00111		
	+0,00477	-0,00629		+0,00453	-0,00176		+0,00187	+0,00011
+0,00200			+0,00155			+0,00091		
	+0,00432	-0,00474		+0,00389	-0,00085		+0,00149	+0,00064
+0,00183			+0,00136			+0,00075		
	+0,00385	-0,00338		+0,00328	-0,00010		+0,00113	+0,00103
+0,00164			+0,00118			+0,00059		
	+0,00339	-0,00220		+0,00269	+0,00049		+0,00081	+0,00130
+0,00145			+0,00100			+0,00046		
	+0,00294	-0,00120		+0,00215	+0,00095		+0,00052	+0,00147
+0,00126			+0,00084			+0,00035		
	+0,00252	-0,00036		+0,00166	+0,00130		+0,00028	+0,00158
+0,00107			+0,00068			+0,00025		
	+0,00213	+0,00032		+0,00123	+0,00155		+0,00007	+0,00162
+0,00091			+0,00054			+0,00016		
	+0,00176	+0,00086		+0,00085	+0,00171		-0,00010	+0,00161
+0,00075			+0,00042			+0,00008		
	+0,00143	+0,00128		+0,00051	+0,00179		-0,00023	+0,00156
+0,00062			+0,00030			+0,00002		
	+0,00111	+0,00158		+0,00023	+0,00181		-0,00034	+0,00147
+0,00049			+0,00021			-0,00004		
	+0,00083	+0,00179		-0,00002	+0,00177		-0,00041	+0,00136
+0,00038			+0,00012			-0,00008		
	+0,00057	+0,00191		-0,00022	+0,00169		-0,00047	+0,00122
+0,00028			+0,00005			-0,00011		
	+0,00034	+0,00196		-0,00038	+0,00158		-0,00050	+0,00108
+0,00020			+0,00000			-0,00014		
	+0,00014	+0,00196		-0,00052	+0,00144		-0,00051	+0,00093
+0,00013			-0,00004			-0,00014		
	-0,00003	+0,00192		-0,00062	+0,00130		-0,00051	+0,00079
+0,00008			-0,00007			-0,00014		
	-0,00018	+0,00185		-0,00069	+0,00116		-0,00050	+0,00066
+0,00003			-0,00010			-0,00014		
	-0,00031	+0,00175		-0,00073	+0,00102		-0,00047	+0,00055
-0,00001			-0,00011			-0,00014		
	-0,00041	+0,00164		-0,00076	+0,00088		-0,00044	+0,00044
-0,00005			-0,00014			-0,00013		
	-0,00050	+0,00150		-0,00075	+0,00075		-0,00041	+0,00034
-0,00009			-0,00015			-0,00013		
	-0,00056	+0,00135		-0,00073	+0,00062		-0,00036	+0,00026
-0,00011			-0,00017			-0,00013		
	-0,00062	+0,00118		-0,00069	+0,00049		-0,00032	+0,00017
-0,00013			-0,00017			-0,00013		
	-0,00066	+0,00101		-0,00065	+0,00036		-0,00026	+0,00010
-0,00015			-0,00019			-0,00013		
	-0,00070	+0,00082		-0,00059	+0,00023		-0,00021	+0,00002
-0,00016			-0,00018			-0,00013		
	-0,00072	+0,00064		-0,00054	+0,00010		-0,00014	-0,00004
-0,00016			-0,00019			-0,00013		
	-0,00075	+0,00044		-0,00042	-0,00003		-0,00008	-0,00011

дуге почитать по закону прямой (к нулю на крайней опоре, соответственно черт. 12).



Таблица III. Ординаты инфлянтных линий опорного давления на средней

$\frac{x}{l}$	$x = 0,10$		$x = 0,15$	Табличные разности для интерполяции.		$x = 0,20$
	по $\frac{x}{l}$	по $x$		по $\frac{x}{l}$	по $x$	
0,0	+0,31242		+0,34414		+0,02504	+0,36918
0,1	+0,31134	-0,00108	+0,34270	-0,00144	+0,02472	+0,36742
0,2	+0,30822	-0,00312	+0,33857	-0,00413	+0,02380	+0,36237
0,3	+0,30327	-0,00495	+0,33203	-0,00654	+0,02238	+0,35441
0,4	+0,29671	-0,00356	+0,32339	-0,00864	+0,02057	+0,34394
0,5	+0,28873	-0,00798	+0,31294	-0,01045	+0,01837	+0,33131
0,6	+0,27954	-0,00919	+0,30097	-0,01197	+0,01595	+0,31692
0,7	+0,26935	-0,01019	+0,28778	-0,01319	+0,01366	+0,30114
0,8	+0,25837	-0,01098	+0,27366	-0,01412	+0,01168	+0,28434
0,9	+0,24680	-0,01157	+0,25892	-0,01474	+0,00800	+0,26692
1,0	+0,23484	-0,01196	+0,24384	-0,01508	+0,00540	+0,24924
1,1	+0,22268	-0,01216	+0,22868	-0,01516	+0,00295	+0,23163
1,2	+0,21042	-0,01226	+0,21356	-0,01512	+0,00067	+0,21423
1,3	+0,19810	-0,01232	+0,19855	-0,01501	-0,00144	+0,19711
1,4	+0,18581	-0,01229	+0,18373	-0,01482	-0,00338	+0,18035
1,5	+0,17353	-0,01228	+0,16918	-0,01455	-0,00514	+0,16404
1,6	+0,16154	-0,01199	+0,15496	-0,01422	-0,00671	+0,14825
1,7	+0,14970	-0,01184	+0,14116	-0,01380	-0,00861	+0,13305
1,8	+0,13814	-0,01156	+0,12786	-0,01330	-0,00932	+0,11854
1,9	+0,12693	-0,01121	+0,11511	-0,01275	-0,01032	+0,10479
2,0	+0,11612	-0,01081	+0,10301	-0,01210	-0,01115	+0,09188
2,1	+0,10579	-0,01033	+0,09161	-0,01140	-0,01176	+0,07986
2,2	+0,09592	-0,00987	+0,08091	-0,01070	-0,01217	+0,06874
2,3	+0,08653	-0,00939	+0,07090	-0,01001	-0,01244	+0,05846
2,4	+0,07760	-0,00893	+0,06155	-0,00935	-0,01252	+0,04902
2,5	+0,06912	-0,00848	+0,05283	-0,00872	-0,01246	+0,04037
2,6	+0,06111	-0,00801	+0,04479	-0,00804	-0,01230	+0,03249
2,7	+0,05354	-0,00757	+0,03734	-0,00745	-0,01200	+0,02534
		-0,00711		-0,00686		

опоре десятипролетной неразрезной балки на равноупругих опорах.

Табличные разности для интерполяции.		$\alpha=0,25$	Табличные разности для интерполяции.		$\alpha=0,30$	Табличные разности для интерполяции.		$\alpha=0,40$
по $\frac{x}{l}$	по $z$		по $\frac{x}{l}$	по $z$		по $\frac{x}{l}$	по $z$	
-0,00176	+0,02080	+0,38998	-0,00206	+0,01785	+0,40783	-0,00233	+0,02971	+0,43754
-0,00305	+0,02050	+0,38792	-0,00588	+0,01758	+0,40550	-0,00664	+0,02922	+0,43472
-0,00796	+0,01967	+0,38204	-0,00923	+0,01683	+0,39886	-0,01042	+0,02783	+0,42669
-0,01047	+0,01840	+0,37281	-0,01214	+0,01563	+0,38844	-0,01365	+0,02580	+0,41414
-0,01263	+0,01673	+0,36067	-0,01457	+0,01412	+0,37479	-0,01637	+0,02295	+0,39774
-0,01439	+0,01479	+0,34610	-0,01656	+0,01232	+0,35842	-0,01854	+0,01975	+0,37817
-0,01578	+0,01262	+0,32954	-0,01809	+0,01034	+0,33988	-0,02018	+0,01621	+0,35609
-0,01680	+0,01031	+0,31145	-0,01916	+0,00825	+0,31970	-0,02129	+0,01249	+0,33219
-0,01742	+0,00795	+0,29229	-0,01977	+0,00612	+0,29841	-0,02187	+0,00873	+0,30714
-0,01768	+0,00560	+0,27252	-0,01993	+0,00402	+0,27654	-0,02191	+0,00507	+0,28161
-0,01761	+0,00335	+0,25259	-0,01969	+0,00204	+0,25463	-0,02150	+0,00165	+0,25628
-0,01740	+0,00127	+0,23290	-0,01930	+0,00023	+0,23313	-0,02094	-0,00140	+0,23173
-0,01712	-0,00063	+0,21360	-0,01885	-0,00141	+0,21219	-0,02030	-0,00408	+0,20811
-0,01676	-0,00236	+0,19475	-0,01831	-9,00286	+0,19189	-0,01958	-0,00641	+0,18548
-0,01631	-0,00391	+0,17644	-0,01769	-0,00413	+0,17231	-0,01887	-0,00841	+0,16390
-0,01579	-0,00529	+0,15875	-0,01699	-0,00524	+0,15351	-0,01794	-0,01007	+0,14344
-0,01520	-0,00649	+0,14176	-0,01622	-0,00619	+0,13557	-0,01699	-0,01141	+0,12416
-0,01451	-0,00751	+0,12554	-0,01537	-0,00696	+0,11858	-0,01599	-0,01247	+0,10611
-0,01375	-0,00837	+0,11017	-0,01444	-0,00758	+0,10259	-0,01490	-0,01324	+0,08935
-0,01291	-0,00906	+0,09573	-0,01343	-0,00804	+0,08769	-0,01374	-0,01375	+0,07394
-0,01202	-0,00958	+0,08230	-0,01236	-0,00835	+0,07395	-0,01253	-0,01400	+0,05995
-0,01112	-0,00992	+0,06994	-0,01131	-0,00852	+0,06142	-0,01135	-0,01401	+0,04741
-0,01028	-0,01011	+0,05863	-0,01032	-0,00856	+0,05007	-0,01023	-0,01381	+0,03626
-0,00944	-0,01015	+0,04831	-0,00936	-0,00847	+0,03984	-0,00918	-0,01343	+0,02641
-0,00865	-0,01007	+0,03895	-0,00845	-0,00821	+0,03066	-0,00817	-0,01288	+0,01778
-0,00788	-0,00987	+0,03050	-0,00759	-0,00801	+0,02249	-0,00723	-0,01220	+0,01029
-0,00715	-0,00958	+0,02291	-0,00676	-0,00765	+0,01525	-0,00634	-0,01141	+0,00385
-0,00645	-0,00919	+0,01615	-0,00599	-0,00723	+0,00892	-0,00552	-0,01054	-0,00162

$\frac{x}{l}$	$\alpha = 0,10$	Табличные разности для интерполяции.		$\alpha = 0,15$	Табличные разности для интерполяции.		$\alpha = 0,20$
		по $\frac{x}{l}$	по $\alpha$		по $\frac{x}{l}$	по $\alpha$	
2,8	+0,04643		-0,01595	+0,03048		-0,01159	+0,01889
2,9	+0,03975	-0,00668	-0,01554	+0,02421	-0,00627	-0,01110	+0,01311
3,0	+0,03352	-0,00623	-0,01501	+0,01851	-0,00570	-0,01054	+0,00797
3,1	+0,02771	-0,00581	-0,01394	+0,01335	-0,00516	-0,00991	+0,00344
3,2	+0,02232	-0,00539	-0,01362	+0,00870	-0,00465	-0,00921	-0,00051
3,3	+0,01731	-0,00501	-0,01278	+0,00453	-0,00417	-0,00847	-0,00394
3,4	+0,01266	-0,00465	-0,01185	+0,00081	-0,00372	-0,00769	-0,00688
3,5	+0,00834	-0,00432	-0,01084	-0,00250	-0,00331	-0,00688	-0,00938
3,6	+0,00434	-0,00400	-0,00977	-0,00543	-0,00293	-0,00603	-0,01146
3,7	+0,00063	-0,00371	-0,00864	-0,00801	-0,00258	-0,00517	-0,01318
3,8	-0,00282	-0,00345	-0,00746	-0,01028	-0,00227	-0,00429	-0,01457
3,9	-0,00603	-0,00321	-0,00625	-0,01228	-0,00200	-0,00339	-0,01567
4,0	-0,00903	-0,00300	-0,00500	-0,01403	-0,00175	-0,00250	-0,01653
4,1	-0,01183	-0,00280	-0,00373	-0,01556	-0,00153	-0,00162	-0,01718
4,2	-0,01447	-0,00264	-0,00244	-0,01691	-0,00135	-0,00073	-0,01764
4,3	-0,01695	-0,00248	-0,00114	-0,01809	-0,00118	+0,00015	-0,01794
4,4	-0,01930	-0,00235	+0,00018	-0,01912	-0,00103	+0,00103	-0,01809
4,5	-0,02153	-0,00223	+0,00150	-0,02003	-0,00091	+0,00190	-0,01813
4,6	-0,02367	-0,00214	+0,00284	-0,02083	-0,00080	+0,00278	-0,01805
4,7	-0,02574	-0,00207	+0,00419	-0,02155	-0,00072	+0,00365	-0,01790
4,8	-0,02775	-0,00201	+0,00555	-0,02220	-0,00065	+0,00452	-0,01768
4,9	-0,02972	-0,00197	+0,00691	-0,02281	-0,00061	+0,00539	-0,01743
5,0	-0,03167	-0,00195	+0,00827	-0,02340	-0,00059	+0,00625	-0,01715

Примечание. В пределах пролета от 5,0  $l$  до 6,0  $l$  ординаты инфлюэнтных линий.

Табличные разности для интерполяции.		$\alpha=0,25$	Табличные разности для интерполяции.		$\alpha=0,30$	Табличные разности для интерполяции.		$\alpha=0,40$
по $\frac{x}{l}$	по $\alpha$		по $\frac{x}{l}$	по $\alpha$		по $\frac{x}{l}$	по $\alpha$	
-0,00578	-0,00873	+0,01016	-0,00527	-0,00676	+0,00340	-0,00475	-0,00960	-0,00620
-0,00514	-0,00822	+0,00489	-0,00457	-0,00624	-0,00135	-0,00404	-0,00863	-0,00998
-0,00453	-0,00765	+0,00032	-0,00394	-0,00571	-0,00539	-0,00339	-0,00767	-0,01305
-0,00395	-0,00706	-0,00362	-0,00334	-0,00516	-0,00878	-0,00279	-0,00670	-0,01548
-0,00343	-0,00644	-0,00696	-0,00279	-0,00461	-0,01157	-0,00223	-0,00576	-0,01733
-0,00294	-0,00581	-0,00975	-0,00229	-0,00405	-0,01380	-0,00173	-0,00484	-0,01864
-0,00250	-0,00516	-0,01204	-0,00182	-0,00349	-0,01553	-0,00128	-0,00396	-0,01948
-0,00208	-0,00448	-0,01386	-0,00141	-0,00295	-0,01681	-0,00087	-0,00310	-0,01991
-0,00172	-0,00381	-0,01527	-0,00105	-0,00241	-0,01768	-0,00051	-0,00229	-0,01997
-0,00139	-0,00314	-0,01632	-0,00072	-0,00187	-0,01819	-0,00020	-0,00151	-0,01970
-0,00110	-0,00247	-0,01704	-0,00044	-0,00135	-0,01839	+0,00006	-0,00079	-0,01918
-0,00086	-0,00181	-0,01748	-0,00021	-0,00085	-0,01833	+0,00027	-0,00011	-0,01844
-0,00065	-0,00116	-0,01769	-0,00001	-0,00037	-0,01806	+0,00044	+0,00052	-0,01754
-0,00046	-0,00052	-0,01770	+0,00015	+0,00008	-0,01762	+0,00058	+0,00109	-0,01653
-0,00030	+0,00009	-0,01755	+0,00030	+0,00050	-0,01704	+0,00072	+0,00162	-0,01542
-0,00015	+0,00069	-0,01725	+0,00043	+0,00093	-0,01632	+0,00083	+0,00209	-0,01423
0,00004	+0,00127	-0,01682	+0,00055	+0,00133	-0,01549	+0,00092	+0,00252	-0,01297
+0,00008	+0,00186	-0,01627	+0,00064	+0,00170	-0,01457	+0,00101	+0,00293	-0,01164
+0,00015	+0,00242	-0,01563	+0,00071	+0,00207	-0,01356	+0,00108	+0,00330	-0,01026
+0,00022	+0,00298	-0,01492	+0,00078	+0,00244	-0,01248	+0,00112	+0,00364	-0,00884
+0,00025	+0,00354	-0,01414	+0,00080	+0,00278	-0,01136	+0,00115	+0,00398	-0,00738
+0,00028	+0,00409	-0,01334	+0,00083	+0,00313	-0,01021	+0,00117	+0,00431	-0,00590
	+0,00464	-0,01251		+0,00347	-0,00904		+0,00462	-0,00442

следует подсчитывать по закону прямой (к нулю на крайней опоре, соответственно черт. 14).

$\frac{x}{l}$	$\alpha = 0,40$	Табличные разности для интерполяции.		$\alpha = 0,50$	Табличные разности для интерполяции.		$\alpha = 0,75$
		по $\frac{x}{l}$	по $\alpha$		по $\frac{x}{l}$	по $\alpha$	
0,0	+0,43754		+0,02434	+0,46188	+0,04706	+0,50894	
0,1	+0,43472	-0,00282	+0,02389	+0,45831	-0,00327	+0,50470	
0,2	+0,42669	-0,00803	+0,02265	+0,44934	-0,00927	+0,49275	
0,3	+0,41414	-0,01255	+0,02074	+0,43488	-0,01446	+0,47417	
0,4	+0,39774	-0,01640	+0,01829	+0,41603	-0,01885	+0,45008	
0,5	+0,37817	-0,01953	+0,01543	+0,39360	-0,02243	+0,42158	
0,6	+0,35609	-0,02208	+0,01231	+0,36840	-0,02520	+0,38978	
0,7	+0,33219	-0,02390	+0,00931	+0,34150	-0,02690	+0,35577	
0,8	+0,30714	-0,02505	+0,00578	+0,31292	-0,02858	+0,32067	
0,9	+0,28161	-0,02553	+0,00264	+0,28425	-0,02867	+0,28558	
1,0	+0,25628	-0,02533	-0,00025	+0,25603	-0,02822	+0,25161	
1,1	+0,23173	-0,02455	-0,00278	+0,22895	-0,02708	+0,21956	
1,2	+0,20811	-0,02362	-0,00493	+0,20318	-0,02577	+0,18991	
1,3	+0,18548	-0,02263	-0,00673	+0,17875	-0,02443	+0,16232	
1,4	+0,16390	-0,02158	-0,00820	+0,15570	-0,02305	+0,13687	
1,5	+0,14344	-0,02046	-0,00937	+0,13407	-0,02163	+0,11352	
1,6	+0,12416	-0,01928	-0,01026	+0,11390	-0,02017	+0,09227	
1,7	+0,10611	-0,01805	-0,01089	+0,09522	-0,01868	+0,07306	
1,8	+0,08935	-0,01676	-0,01126	+0,07809	-0,02216	+0,05589	
1,9	+0,07394	-0,01541	-0,01141	+0,06253	-0,01556	+0,04071	
2,0	+0,05995	-0,01399	-0,01136	+0,04859	-0,01713	+0,02751	
2,1	+0,04741	-0,01254	-0,01113	+0,03628	-0,01393	+0,01624	
2,2	+0,03626	-0,01115	-0,01074	+0,02552	-0,01231	+0,00676	
2,3	+0,02641	-0,00985	-0,01021	+0,01620	-0,01076	-0,00108	
2,4	+0,01778	-0,00863	-0,00957	+0,00821	-0,00932	-0,00742	
2,5	+0,01029	-0,00749	-0,00883	+0,00214	-0,00799	-0,01243	
2,6	+0,00385	-0,00644	-0,00803	-0,00418	-0,00675	-0,01624	
2,7	-0,0162	-0,00547	-0,00718	-0,00880	-0,00564	-0,01901	
		-0,00458			-0,00462		
					-0,00371		

Табличные разности для интерполяции.		$\alpha = 1.00$	Табличные разности для интерполяции.		$\alpha = 1.50$	Табличные разности для интерполяции.		$\alpha = 2.00$
по $\frac{x}{l}$	по $x$		по $\frac{x}{l}$	по $x$		по $\frac{x}{l}$	по $x$	
-0,00424	+0,03551	+0,54445	-0,00505	+0,05266	+0,59711	-0,00638	+0,03875	+0,63587
-0,01195	+0,03470	+0,53940	-0,01422	+0,05133	+0,59073	-0,01794	+0,03767	+0,62840
-0,01858	+0,03243	+0,52518	-0,02203	+0,04761	+0,57279	-0,02769	+0,03457	+0,60746
-0,02409	+0,02898	+0,50315	-0,02847	+0,04195	+0,54510	-0,03561	+0,03014	+0,57524
-0,02850	+0,02460	+0,47468	-0,03355	+0,03481	+0,50949	-0,04174	+0,02441	+0,53390
-0,03181	+0,01955	+0,44113	-0,03727	+0,02662	+0,46775	-0,04604	+0,01790	+0,48565
-0,03401	+0,01408	+0,40386	-0,03960	+0,01785	+0,42171	-0,04854	+0,00877	+0,43048
-0,03510	+0,00849	+0,36426	-0,04058	+0,00891	+0,37317	-0,04921	+0,00396	+0,37713
-0,03509	+0,00301	+0,32368	-0,04019	+0,00028	+0,32396	-0,04608	-0,00273	+0,32123
-0,03397	-0,00209	+0,28349	-0,03844	-0,00761	+0,27588	-0,04514	-0,00873	+0,26715
-0,03195	-0,00656	+0,24505	-0,03556	-0,00801	+0,23074	-0,04072	-0,01367	+0,21707
-0,02975	-0,01017	+0,20949	-0,03254	-0,01947	+0,19002	-0,03622	-0,01727	+0,17275
-0,02759	-0,01296	+0,17695	-0,02962	-0,02315	+0,15380	-0,03200	-0,01960	+0,13420
-0,02545	-0,01499	+0,14733	-0,02681	-0,02553	+0,12180	-0,02803	-0,02080	+0,10100
-0,02335	-0,01635	+0,12052	-0,02410	-0,02675	+0,09377	-0,02432	-0,02104	+0,07273
-0,02125	-0,01710	+0,09642	-0,02150	-0,02697	+0,06945	-0,02088	-0,02049	+0,04896
-0,01921	-0,01735	+0,07492	-0,01900	-0,02635	+0,04857	-0,01770	-0,01928	+0,02929
-0,01717	-0,01714	+0,05592	-0,01660	-0,02505	+0,03087	-0,01479	-0,01759	+0,01328
-0,01518	-0,01657	+0,03932	-0,01430	-0,02324	+0,01608	-0,01214	-0,01555	+0,00053
-0,01320	-0,01569	+0,02502	-0,01211	-0,02108	+0,00394	-0,00976	-0,01338	-0,00944
-0,01127	-0,01460	+0,01290	-0,01005	-0,01872	-0,00582	-0,00798	-0,01110	-0,01692
-0,00948	-0,01338	+0,00286	-0,00813	-0,01667	-0,01381	-0,00535	-0,00860	-0,02241
-0,00784	-0,01203	-0,00527	-0,00641	-0,01389	-0,01916	-0,00401	-0,00698	-0,02614
-0,00634	-0,01060	-0,01168	-0,00487	-0,01149	-0,02317	-0,00253	-0,00514	-0,02831
-0,00501	-0,00913	-0,01655	-0,00350	-0,00915	-0,02570	-0,00125	-0,00344	-0,02914
-0,00381	-0,00762	-0,02055	-0,00233	-0,00690	-0,02695	-0,00018	-0,00190	-0,02885
-0,00277	-0,00614	-0,02238	-0,00132	-0,00475	-0,02713	+0,00067	-0,00053	-0,02766
-0,00189	-0,00469	-0,02370	-0,00051	-0,00276	-0,02646	+0,00131	+0,00068	-0,02578

$\frac{x}{l}$	$\alpha = 0,40$	Табличные разности для интерполяции.		$\alpha = 0,50$	Табличные разности для интерполяции.		$\alpha = 0,75$
		по $\frac{x}{l}$	по $\alpha$		по $\frac{x}{l}$	по $\alpha$	
2,8	-0,00620		-0,00631	-0,01251	-0,00389		-0,02090
2,9	-0,00998	-0,00378	-0,00544	-0,01542	-0,00291	-0,00662	-0,02204
3,0	-0,01305	-0,00307	-0,00459	-0,01764	-0,00222	-0,00497	-0,02261
3,1	-0,01548	-0,00243	-0,00378	-0,01926	-0,00162	-0,00346	-0,02272
3,2	-0,01733	-0,00185	-0,00301	-0,02034	-0,00108	-0,00210	-0,02244
3,3	-0,01864	-0,00131	-0,00231	-0,02095	-0,00061	-0,00088	-0,02183
3,4	-0,01949	-0,00085	-0,00164	-0,02113	-0,00018	+0,00020	-0,02093
3,5	-0,01991	-0,00042	-0,00101	-0,02093	+0,00020	+0,00113	-0,01980
3,6	-0,01997	-0,00006	-0,00045	-0,02042	+0,00051	+0,00194	-0,01848
3,7	-0,01970	+0,00027	+0,00006	-0,01964	+0,00078	+0,00263	-0,01701
3,8	-0,01918	+0,00052	+0,00053	-0,01865	+0,00099	+0,00319	-0,01546
3,9	-0,01844	+0,00074	+0,00094	-0,01753	+0,00115	+0,00363	-0,01387
4,0	-0,01754	+0,00090	+0,00130	-0,01624	+0,00126	+0,00395	-0,01229
4,1	-0,01653	+0,00101	+0,00160	-0,01493	+0,00131	+0,00417	-0,01076
4,2	-0,01542	+0,00111	+0,00185	-0,01357	+0,00136	+0,00428	-0,00929
4,3	-0,01423	+0,00119	+0,00206	-0,01217	+0,00140	+0,00431	-0,00786
4,4	-0,01297	+0,00126	+0,00223	-0,01074	+0,00143	+0,00427	-0,00647
4,5	-0,01164	+0,00133	+0,00236	-0,00928	+0,00146	+0,00416	-0,00512
4,6	-0,01026	+0,00138	+0,00247	-0,00779	+0,00149	+0,00399	-0,00380
4,7	-0,00884	+0,00142	-0,00256	-0,00628	+0,00151	+0,00376	-0,00250
4,8	-0,00738	+0,00146	+0,00263	-0,00475	+0,00153	+0,00353	-0,00122
4,9	-0,00590	+0,00148	+0,00268	-0,00322	+0,00153	+0,00327	+0,00005
5,0	-0,00442	+0,00149	+0,00274	-0,00168	+0,00154	+0,00300	+0,00132

Примечание. В пределах пролета от 5,0 l до 6,0 l ординаты инфлюэнтных линий

Табличные разности для интерполяции.		$\alpha = 1.00$	Табличные разности для интерполяции.		$\alpha = 1.50$	Табличные разности для интерполяции.		$\alpha = 2.00$
по $\frac{x}{l}$	по $\alpha$		по $\frac{x}{l}$	по $\alpha$		по $\frac{x}{l}$	по $\alpha$	
-0,00114	-0,00331	-0,02421	+0,00014	-0,00094	-0,02515	+0,00175	+0,00171	-0,02344
-0,00057	-0,00203	-0,02407	+0,00059	+0,00067	-0,02340	+0,00197	+0,00256	-0,02084
-0,00011	-0,00037	-0,02348	+0,00089	+0,00205	-0,02143	+0,00200	+0,00323	-0,01821
+0,00028	+0,00013	-0,02259	+0,00112	+0,00316	-0,01943	+0,00200	+0,00371	-0,01572
+0,00061	+0,00097	-0,02147	+0,00133	+0,00404	-0,01743	+0,00197	+0,00402	-0,01341
+0,00090	+0,00169	-0,02014	+0,00147	+0,00468	-0,01546	+0,00193	+0,00418	-0,01128
+0,00113	+0,00226	-0,01867	+0,00159	+0,00514	-0,01353	+0,00186	+0,00420	-0,00933
+0,00132	+0,00272	-0,01708	+0,00167	+0,00541	-0,01167	+0,00177	+0,00411	-0,00756
+0,00147	+0,00307	-0,01541	+0,00170	+0,00561	-0,00990	+0,00168	+0,00394	-0,00596
+0,00155	+0,00330	-0,01371	+0,00170	+0,00549	-0,00822	+0,00155	+0,00369	-0,00453
+0,00159	+0,00345	-0,01201	+0,00165	+0,00534	-0,00667	+0,00142	+0,00339	-0,00328
+0,00158	+0,00351	-0,01036	+0,00156	+0,00511	-0,00525	+0,00126	+0,00305	-0,00220
+0,00153	+0,00349	-0,00880	+0,00145	+0,00481	-0,00399	+0,00109	+0,00270	-0,00128
+0,00147	+0,00341	-0,00735	+0,00134	+0,00445	-0,00290	+0,00094	+0,00236	-0,00054
+0,00143	+0,00328	-0,00601	+0,00123	+0,00405	-0,00196	+0,00079	+0,00202	+0,00006
+0,00139	+0,00308	-0,00478	+0,00115	+0,00361	-0,00117	+0,00067	+0,00169	+0,00052
+0,00135	+0,00284	-0,00363	+0,00107	+0,00313	-0,00050	+0,00057	+0,00137	+0,00087
+0,00132	+0,00256	-0,00256	+0,00101	+0,00263	+0,00007	+0,00048	+0,00104	+0,00111
+0,00130	+0,00225	-0,00155	+0,00095	+0,00210	+0,00055	+0,00041	+0,00072	+0,00127
+0,00128	+0,00190	-0,00060	+0,00092	+0,00156	+0,00096	+0,00036	+0,00040	+0,00136
+0,00127	+0,00154	+0,00032	+0,00090	+0,00100	+0,00132	+0,00032	+0,00008	+0,00140
+0,00127	+0,00117	+0,0012	+0,00088	+0,00042	+0,00164	+0,00030	-0,00023	+0,00141
	+0,00078	+0,00210		-0,00016	+0,00194		-0,00054	+0,00140

следует подсчитывать по закону прямой (к нулю на крайней опоре, соответственно черт. 14).



Таблица IV. Ординаты инфлюэнтных линий опорного давления на 6-й опоре

$\frac{x}{l}$	$\alpha = 0,10$	Табличные разности для интерполяции.		$\alpha = 0,15$	Табличные разности для интерполяции.		$\alpha = 0,20$
		по $\frac{x}{l}$	по $\alpha$		по $\frac{x}{l}$	по $\alpha$	
0,0	+0,34091	-0,00520	+0,02875	+0,36966	-0,00452	+0,02065	+0,39031
0,1	+0,33571	-0,00692	+0,02949	+0,36514	-0,00700	+0,02120	+0,38634
0,2	+0,32879	-0,00846	+0,02935	+0,35814	-0,00921	+0,02107	+0,37921
0,3	+0,32033	-0,00979	+0,02860	+0,34893	-0,01112	+0,02037	+0,36930
0,4	+0,31054	-0,01092	+0,02727	+0,33781	-0,01274	+0,01917	+0,35698
0,5	+0,29962	-0,01188	+0,02545	+0,32507	-0,01407	+0,01756	+0,34263
0,6	+0,28774	-0,01263	+0,02326	+0,31100	-0,01512	+0,01564	+0,32664
0,7	+0,27511	-0,01318	+0,02077	+0,29588	-0,01587	+0,01348	+0,30936
0,8	+0,26193	-0,01355	+0,01808	+0,28001	-0,01633	+0,01119	+0,29120
0,9	+0,24838	-0,01371	+0,01530	+0,26368	-0,01652	+0,00884	+0,27252
1,0	+0,23467	-0,01371	+0,01249	+0,24716	-0,01643	+0,00653	+0,25369
1,1	+0,22096	-0,01363	+0,00977	+0,23073	-0,01625	+0,00433	+0,23506
1,2	+0,20733	-0,01350	+0,00715	+0,21448	-0,01600	+0,00226	+0,21674
1,3	+0,19383	-0,01331	+0,00465	+0,19848	-0,01568	+0,00032	+0,19880
1,4	+0,18050	-0,01307	+0,00228	+0,18280	-0,01531	-0,00148	+0,18132
1,5	+0,16745	-0,01278	+0,00004	+0,16746	-0,01485	-0,00312	+0,16437
1,6	+0,15467	-0,01243	-0,00203	+0,15264	-0,01433	-0,00462	+0,14802
1,7	+0,14224	-0,01202	-0,00393	+0,13831	-0,01375	-0,00595	+0,13236
1,8	+0,13022	-0,01157	-0,00566	+0,12456	-0,01311	-0,00712	+0,11744
1,9	+0,11865	-0,01106	-0,00720	+0,11145	-0,01238	-0,00810	+0,10335
2,0	+0,10759	-0,01051	-0,00852	+0,09907	-0,01162	-0,00891	+0,09011
2,1	+0,09708	-0,00996	-0,00963	+0,08745	-0,01085	-0,00953	+0,07792
2,2	+0,08712	-0,00942	-0,01052	+0,07660	-0,01012	-0,00999	+0,06661
2,3	+0,07770	-0,00888	-0,01122	+0,06648	-0,00939	-0,01027	+0,05621
2,4	+0,06882	-0,00837	-0,01173	+0,05709	-0,00871	-0,01042	+0,04667
2,5	+0,06045	-0,00786	-0,01207	+0,04838	-0,00802	-0,01042	+0,03796
2,6	+0,05259	-0,00736	-0,01223	+0,04036	-0,00738	-0,01030	+0,03006
2,7	+0,04523	-0,00687	-0,01225	+0,03298	-0,00675	-0,01007	+0,02291

шестипроцентной неразрезной балки на равноупругих опорах.

Табличные разности для интерполяции.		$\alpha=0,25$	Табличные разности для интерполяции.		$\alpha=0,30$	Табличные разности для интерполяции.		$\alpha=0,40$
по $\frac{x}{l}$	по $\alpha$		по $\frac{x}{l}$	по $\alpha$		по $\frac{x}{l}$	по $\alpha$	
-0,00397	+0,01845	+0,40876	-0,00358	+0,01673	+0,42549	-0,00331	+0,02941	+0,45490
-0,00713	+0,01884	+0,40518	-0,00738	+0,01700	+0,42218	-0,00767	+0,02966	+0,45184
-0,00991	+0,01859	+0,39780	-0,01065	+0,01671	+0,41451	-0,01148	+0,02888	+0,44339
-0,01232	+0,01785	+0,38715	-0,01353	+0,01588	+0,40303	-0,01473	+0,02723	+0,43026
-0,01435	+0,01664	+0,37362	-0,01591	+0,01468	+0,38830	-0,01745	+0,02484	+0,41314
-0,01599	+0,01508	+0,35771	-0,01785	+0,01314	+0,37085	-0,01962	+0,02189	+0,39274
-0,01728	+0,01322	+0,33986	-0,01931	+0,01137	+0,35123	-0,02125	+0,01852	+0,36975
-0,01816	+0,01119	+0,32055	-0,02031	+0,00943	+0,32998	-0,02233	+0,01490	+0,34488
-0,01868	+0,00904	+0,30024	-0,02085	+0,00741	+0,30765	-0,02288	+0,01117	+0,31882
-0,01833	+0,00687	+0,27939	-0,02093	+0,00538	+0,28477	-0,02286	+0,00751	+0,29228
-0,01863	+0,00477	+0,25846	-0,02060	+0,00345	+0,26191	-0,02239	+0,00405	+0,26595
-0,01832	+0,00280	+0,23786	-0,02015	+0,00166	+0,23952	-0,02177	+0,00091	+0,24043
-0,01794	+0,00097	+0,21771	-0,01961	-0,00004	+0,21775	-0,02107	-0,00186	+0,21589
-0,01748	-0,00070	+0,19810	-0,01900	-0,00142	+0,19668	-0,02030	-0,00430	+0,19238
-0,01695	-0,00222	+0,17910	-0,01831	-0,00272	+0,17638	-0,01945	-0,00641	+0,16997
-0,01635	-0,00358	+0,16379	-0,01755	-0,00386	+0,15693	-0,01854	-0,00820	+0,14873
-0,01566	-0,00478	+0,14324	-0,01671	-0,00485	+0,13839	-0,01755	-0,00959	+0,12870
-0,01492	-0,00583	+0,12653	-0,01591	-0,00569	+0,12084	-0,01648	-0,01088	+0,10996
-0,01409	-0,00672	+0,11072	-0,01481	-0,00636	+0,10436	-0,01534	-0,01179	+0,09257
-0,01319	-0,00744	+0,09591	-0,01376	-0,00689	+0,08902	-0,01414	-0,01244	+0,07658
-0,01224	-0,00801	+0,08215	-0,01263	-0,00727	+0,07488	-0,01287	-0,01282	+0,06206
-0,01131	-0,00340	+0,06952	-0,01156	-0,00751	+0,06201	-0,01166	-0,01296	+0,04905
-0,01041	0,00865	+0,05796	-0,01051	-0,00761	+0,05035	-0,01049	-0,01187	+0,03748
-0,00954	-0,00876	+0,04745	-0,00951	-0,00759	+0,03986	-0,00939	-0,01259	+0,02727
-0,00871	-0,00873	+0,03794	-0,00858	-0,00747	+0,03047	-0,00831	-0,01215	+0,01832
-0,00790	-0,00860	+0,02936	-0,00778	-0,00725	+0,02211	-0,00738	-0,01155	+0,01056
-0,00715	-0,00838	+0,02168	-0,00683	-0,00695	+0,01473	-0,00647	-0,01085	+0,00388
-0,00642	-0,00806	+0,01485	-0,00603	-0,00659	+0,00826	-0,00561	-0,01004	-0,00178

$\frac{\lambda}{l}$	$\alpha = 0,10$	Табличные разности для интерполяции.		$\alpha = 0,15$	Табличные разности для интерполяции.		$\alpha = 0,20$
		по $\frac{x}{l}$	по $x$		по $\frac{x}{l}$	по $x$	
2,8	+0,03836		-0,01213	+0,02623		-0,00974	+0,01649
2,9	+0,03196	-0,00640	-0,01187	+0,02009	-0,00614	-0,00933	+0,01076
3,0	+0,02602	-0,00594	-0,01149	+0,01453	-0,00556	-0,00884	+0,00569
3,1	+0,02054	-0,00548	-0,01101	+0,00953	-0,00500	-0,00829	+0,00124
3,2	+0,01548	-0,00506	-0,01042	+0,00506	-0,00447	-0,00769	-0,00263
3,3	+0,01082	-0,00466	-0,00974	+0,00108	-0,00398	-0,00704	-0,00596
3,4	+0,00654	-0,00428	-0,00899	-0,00245	-0,00353	-0,00634	-0,00879
3,5	+0,00261	-0,00393	-0,00816	-0,00555	-0,00310	-0,00562	-0,01117
3,6	+0,00100	-0,00361	-0,00727	-0,00827	-0,00272	-0,00487	-0,01314
3,7	-0,00432	-0,00332	-0,00632	-0,01064	-0,00237	-0,00409	-0,01473
3,8	-0,00737	-0,00305	-0,00532	-0,01269	-0,00205	-0,00331	-0,01600
3,9	-0,01018	-0,00281	-0,00429	+0,01447	-0,00178	-0,00250	-0,01697
4,0	-0,01277	-0,00259	-0,00323	-0,01600	-0,00153	-0,00170	-0,01770
4,1	-0,01517	-0,00240	-0,00215	-0,01732	-0,00132	-0,00090	-0,01822
4,2	-0,01741	-0,00224	-0,00103	-0,01844	-0,00112	-0,00012	-0,01856
4,3	-0,01949	-0,00208	+0,00008	-0,01941	-0,00097	+0,00068	-0,01873
4,4	-0,02144	-0,00195	+0,00122	-0,02022	-0,00081	+0,00146	-0,01876
4,5	-0,02328	-0,00184	+0,00236	-0,02092	-0,00070	+0,00225	-0,01867
4,6	-0,02502	-0,00174	+0,00352	-0,02150	-0,00058	+0,00303	-0,01847
4,7	-0,02669	-0,00167	+0,00469	-0,02200	-0,00050	+0,00381	-0,01819
4,8	-0,02830	-0,00161	+0,00585	-0,02245	-0,00045	+0,00465	-0,01785
4,9	-0,02987	-0,00157	+0,00703	-0,02284	-0,00039	+0,00537	-0,01747
5,0	-0,03143	-0,00156	+0,00821	-0,02322	-0,00038	+0,00615	-0,01707

Примечание: В пределах пролета от 5,0  $l$  до 6,0  $l$  ординаты инфлюэнтных линий

Табличные разности для интерполяции.		$\alpha=0,25$	Табличные разности для интерполяции.		$\alpha=0,30$	Табличные разности для интерполяции.		$\alpha=0,40$
по $\frac{x}{l}$	по $x$		по $\frac{x}{l}$	по $x$		по $\frac{x}{l}$	по $x$	
-0,00573	-0,00767	+0,00882	-0,00529	-0,00617	+0,00265	-0,00483	-0,00918	-0,00653
-0,00507	-0,00723	+0,00353	-0,00458	-0,00571	-0,00218	-0,00409	-0,00817	-0,01045
-0,00445	-0,00673	-0,00104	-0,00392	-0,00522	-0,00627	-0,00343	-0,00735	-0,01362
-0,00387	-0,00621	-0,00497	-0,00332	-0,00473	-0,00970	-0,00281	-0,00643	-0,01613
-0,00339	-0,00566	-0,00829	-0,00275	-0,00422	-0,01251	-0,00224	-0,00553	-0,01804
-0,00283	-0,00508	-0,01104	-0,00224	-0,00371	-0,01475	-0,00172	-0,00466	-0,01941
-0,00238	-0,00449	-0,01328	-0,00178	-0,00319	-0,01647	-0,00126	-0,00381	-0,02025
-0,00197	-0,00389	-0,01506	-0,00135	-0,00267	-0,01773	-0,00084	-0,00299	-0,02071
-0,00159	-0,00327	-0,01641	-0,00097	-0,00216	-0,01857	-0,00047	-0,00219	-0,02076
-0,00127	-0,00265	-0,01738	-0,00065	-0,00166	-0,01904	-0,00016	-0,00144	-0,02048
-0,00097	-0,00203	-0,01803	-0,00037	-0,00117	-0,01920	+0,00010	-0,00073	-0,01993
-0,00073	-0,00143	-0,01840	-0,00013	-0,00070	-0,01910	+0,00032	-0,00005	-0,01915
-0,00052	-0,00083	-0,01853	+0,00006	-0,00025	-0,01878	+0,00050	+0,00056	-0,01822
-0,00034	-0,00025	-0,01847	+0,00023	+0,00019	-0,01828	+0,00064	+0,00113	-0,01716
-0,00017	+0,00032	-0,01824	+0,00038	+0,00060	-0,01764	+0,00077	+0,00163	-0,01601
-0,00003	+0,00087	-0,01786	+0,00052	+0,00099	-0,01687	+0,00089	+0,00209	-0,01478
+0,00009	+0,00142	-0,01734	+0,00062	+0,00136	-0,01598	+0,00098	+0,00252	-0,01346
+0,00020	+0,00195	-0,01672	+0,00072	+0,00172	-0,01500	+0,00107	+0,00292	-0,01208
+0,00028	+0,00247	-0,01600	+0,00080	+0,00207	-0,01393	+0,00114	+0,00329	-0,01064
+0,00034	+0,00299	-0,01520	+0,00085	+0,00241	-0,01279	+0,00118	+0,00363	-0,00916
+0,00038	+0,00350	-0,01435	+0,00089	+0,00274	-0,01161	+0,00122	+0,00396	-0,00765
+0,00040	+0,00401	-0,01346	+0,00091	+0,00307	-0,01039	+0,00123	+0,00428	-0,00611
	+0,00452	-0,01255		+0,00339	-0,00916		+0,00459	-0,00457

следует подсчитывать по закону прямой (к нулю на крайней опоре, соответственно черт. 16).

$\frac{x}{l}$	$\alpha = 0,40$	Табличные разности для интерполяции		$\alpha = 0,50$	Табличные разности для интерполяции		$\alpha = 0,75$
		по $\frac{x}{l}$	по $\alpha$		по $\frac{x}{l}$	по $\alpha$	
0,0	+0,45490		+0,02530	+0,48020	+0,05109	+0,53130	
0,1	+0,45184	-0,00306	+0,02531	+0,17715	-0,00305	+0,52770	
0,2	+0,44339	-0,00845	+0,02440	+0,46779	-0,00936	+0,51588	
0,3	+0,43326	-0,01313	+0,02272	+0,45298	-0,01481	+0,49700	
0,4	+0,41314	-0,01712	+0,02041	+0,43355	-0,01943	+0,47222	
0,5	+0,39274	-0,02040	+0,01762	+0,41036	-0,23319	+0,44272	
0,6	+0,36975	-0,02299	+0,01450	+0,38425	-0,02611	+0,40967	
0,7	+0,34488	-0,02487	+0,01117	+0,35605	-0,02820	+0,37424	
0,8	+0,31882	-0,02606	+0,00781	+0,32663	-0,02942	+0,33759	
0,9	+0,29228	-0,02654	+0,00454	+0,29682	-0,02981	+0,30090	
1,0	+0,26595	-0,02633	+0,00151	+0,26746	-0,02936	+0,26533	
1,1	+0,24043	-0,02552	-0,00116	+0,23927	-0,02818	+0,23185	
1,2	+0,21589	-0,02454	-0,00347	+0,21242	-0,02685	+0,20065	
1,3	+0,19238	-0,02351	-0,00542	+0,18696	-0,02546	+0,17169	
1,4	+0,16997	-0,02241	-0,00704	+0,16293	-0,02403	+0,14494	
1,5	+0,14873	-0,02124	-0,00836	+0,14037	-0,02256	+0,12039	
1,6	+0,12870	-0,02003	-0,00938	+0,11932	-0,02105	+0,09802	
1,7	+0,10996	-0,01874	-0,01013	+0,09983	-0,01949	+0,07778	
1,8	+0,09257	-0,01739	-0,01063	+0,08194	-0,01789	+0,05967	
1,9	+0,07658	-0,01599	-0,01089	+0,06569	-0,01625	+0,04365	
2,0	+0,06206	-0,01452	-0,01094	+0,05112	-0,01457	+0,02970	
2,1	+0,04905	-0,01301	-0,01080	+0,03825	-0,01237	+0,01778	
2,2	+0,03748	-0,01157	-0,01049	+0,02699	-0,01126	+0,00775	
2,3	+0,02727	-0,01021	-0,01003	+0,01724	-0,00975	-0,00056	
2,4	+0,01832	-0,00895	-0,00924	+0,00888	-0,00836	-0,00729	
2,5	+0,01056	-0,00776	-0,00876	+0,00180	-0,00708	-0,01262	
2,6	+0,00388	-0,00668	-0,00799	-0,00411	-0,00591	-0,01668	
2,7	-0,00178	-0,00565	-0,00718	-0,00896	-0,00485	-0,01966	
2,8	-0,00653	-0,00475	-0,00633	-0,01286	-0,00370	-0,02169	
		-0,00392			-0,00306		

Табличные разности для интерполяции		$\alpha = 1,00$	Табличные разности для интерполяции		$\alpha = 1,50$	Табличные разности для интерполяции		$\alpha = 2,00$
по $\frac{x}{l}$	по $\alpha$		по $\frac{x}{l}$	по $\alpha$		по $\frac{x}{l}$	по $\alpha$	
-0,00359	+0,03963	+0,57093	-0,00450	+0,05905	+0,62998	-0,00660	+0,04285	+0,67283
-0,01182	+0,03873	+0,56643	-0,01429	+0,05595	+0,62338	-0,01883	+0,04078	+0,66416
-0,01888	+0,03626	+0,55214	-0,02264	+0,05241	+0,60455	-0,02914	+0,03688	+0,64143
-0,02478	+0,03250	+0,52950	-0,02953	+0,04591	+0,57541	-0,03753	+0,03151	+0,60692
-0,02950	+0,02775	+0,49997	-0,03497	+0,03791	+0,53788	-0,04400	+0,02504	+0,56292
-0,03305	+0,02228	+0,46500	-0,03896	+0,02888	+0,49388	-0,04857	+0,01786	+0,51174
-0,03543	+0,01637	+0,42604	-0,04151	+0,01927	+0,44531	-0,05121	+0,01033	+0,45564
-0,03665	+0,01030	+0,38454	-0,04260	+0,00956	+0,39410	-0,05193	+0,00283	+0,39693
-0,03669	+0,00435	+0,34194	-0,04224	+0,00023	+0,34217	-0,05075	-0,00427	+0,33790
-0,03557	-0,00120	+0,29970	-0,04043	-0,00828	+0,29142	-0,04765	-0,01059	+0,28083
-0,03348	-0,00605	+0,25927	-0,03743	-0,01550	+0,24377	-0,04299	-0,01575	+0,22802
-0,03120	-0,01001	+0,22184	-0,03427	-0,02106	+0,20078	-0,03825	-0,01948	+0,18130
-0,02896	-0,01308	+0,18757	-0,03123	-0,02504	+0,16253	-0,03378	-0,02185	+0,14068
-0,02675	-0,01535	+0,15634	-0,02829	-0,02759	+0,12875	-0,02960	-0,02303	+0,10572
-0,02455	-0,01689	+0,12805	-0,02599	-0,02890	+0,09915	-0,02569	-0,02319	+0,07596
-0,02237	-0,01779	+0,10260	-0,02271	-0,02914	+0,07346	-0,02206	-0,02249	+0,05097
-0,02024	-0,01813	+0,07939	-0,02010	-0,02849	+0,05140	-0,01870	-0,02110	+0,03030
-0,01811	-0,01799	+0,05979	-0,01757	-0,02709	+0,03270	-0,01563	-0,01920	+0,01350
-0,01602	-0,01745	+0,04222	-0,01515	-0,02515	+0,01707	-0,01283	-0,01695	+0,00012
-0,01395	-0,01658	+0,02707	-0,01285	-0,02283	+0,00424	-0,01032	-0,01451	-0,01027
-0,01192	-0,01549	+0,01422	-0,00980	-0,02029	-0,00607	-0,00806	-0,01205	-0,01813
-0,01003	-0,01336	+0,00442	-0,00951	-0,01856	-0,01414	-0,00604	-0,00972	-0,02386
-0,00831	-0,01284	-0,00509	-0,00682	-0,01509	-0,01018	-0,00429	-0,00756	-0,02774
-0,00673	-0,01135	-0,01191	-0,00519	-0,01252	-0,02443	-0,00267	-0,00555	-0,02998
-0,00533	-0,00981	-0,01710	-0,00375	-0,01010	-0,02710	-0,00133	-0,00372	-0,03082
-0,00406	-0,00823	-0,02085	-0,00293	-0,00758	-0,02843	-0,00020	-0,00206	-0,03049
-0,00298	-0,00710	-0,02378	-0,00102	-0,00485	-0,02863	+0,00071	-0,00057	-0,02920
-0,00203	-0,00514	-0,02480	-0,00057	-0,00312	-0,02792	+0,00138	+0,00072	-0,02720
-0,00126	-0,00368	-0,02537	+0,00010	-0,00117	-0,02654	+0,00184	+0,00183	-0,02471

$\frac{x}{l}$	$\alpha = 0,40$	Табличные разности для интерполяции.		$\alpha = 0,50$	Табличные разности для интерполяции.		$\alpha = 0,75$
		по $\frac{x}{l}$	по $\alpha$		по $\frac{x}{l}$	по $\alpha$	
2,9	-0,01045		-0,00547	-0,01590	-0,00703		-0,02295
3,0	-0,01362	-0,00317	-0,00464	-0,01826	-0,00632		-0,02358
3,1	-0,01613	-0,00251	-0,00384	-0,01997	-0,00577		-0,02374
3,2	-0,01804	-0,00199	-0,00308	-0,02112	-0,00515		-0,02348
3,3	-0,01941	-0,00137	-0,00236	-0,02177	-0,00465		-0,02287
3,4	-0,02028	-0,00087	-0,00169	-0,02197	-0,00420	+0,00002	-0,02195
3,5	-0,02071	-0,00043	-0,00107	-0,02178	+0,00018	+0,00100	-0,02078
3,6	-0,02076	-0,00005	-0,00050	-0,02126	+0,00062	+0,00185	-0,01941
3,7	-0,02048	+0,00028	+0,00002	-0,02046	+0,00080	+0,00257	-0,01789
3,8	-0,01993	+0,00055	+0,00050	-0,01943	+0,00103	+0,00316	-0,01627
3,9	-0,01915	+0,00078	+0,00091	-0,01824	+0,00119	+0,00363	-0,01461
4,0	-0,01822	+0,00093	+0,00128	-0,01694	+0,00130	+0,00398	-0,01296
4,1	-0,01716	+0,00106	+0,00158	-0,01556	+0,00136	+0,00422	-0,01136
4,2	-0,01601	+0,00115	+0,00184	-0,01417	+0,00141	+0,00436	-0,00981
4,3	-0,01477	+0,00124	+0,00205	-0,01272	+0,00145	+0,00441	-0,00831
4,4	-0,01346	+0,00131	+0,00224	-0,01122	+0,00151	+0,00433	-0,00681
4,5	-0,01208	+0,00138	+0,00238	-0,00970	+0,00152	+0,00427	-0,00543
4,6	-0,01064	+0,00144	+0,00249	-0,00815	+0,00155	+0,00411	-0,00404
4,7	-0,00916	+0,00148	+0,00258	-0,00658	+0,00157	+0,00391	-0,00267
4,8	-0,00765	+0,00151	+0,00266	-0,00499	+0,00159	+0,00367	-0,00132
4,9	-0,00611	+0,00154	+0,00272	-0,00339	+0,00160	+0,00340	+0,00001
5,0	-0,00457	+0,00154	+0,00278	-0,00179	+0,00160	+0,00313	+0,00134

Примечание. В пределах пролета от 5,0 l до 6,0 l ординаты инфляэнтных линий

Табличные разности для интерполяции.		$\alpha=1,00$	Табличные разности для интерполяции.		$\alpha=1,50$	Табличные разности для интерполяции.		$\alpha=2,00$
по $\frac{x}{l}$	по $\alpha$		по $\frac{x}{l}$	по $\alpha$		по $\frac{x}{l}$	по $\alpha$	
-0,00063	-0,00232	-0,02527	+0,00059	+0,00057	-0,02470	+0,00207	+0,00274	-0,02196
-0,00016	-0,00109	-0,02468	+0,00091	+0,00205	-0,02263	+0,00211	+0,00346	-0,01917
+0,00026	-0,00003	-0,02377	+0,00117	+0,00325	-0,02052	+0,00211	+0,00398	-0,01654
+0,00061	+0,00088	-0,02260	+0,00137	+0,00419	-0,01841	+0,00208	+0,00431	-0,01410
+0,00092	+0,00164	-0,02123	+0,00154	+0,00490	-0,01633	+0,00203	+0,00447	-0,01186
+0,00117	+0,00226	-0,01969	+0,00167	+0,00539	-0,01430	+0,00197	+0,00456	-0,00974
+0,00137	+0,00276	-0,01802	+0,00173	+0,00569	-0,01233	+0,00187	+0,00446	-0,00793
+0,00152	+0,00313	-0,01628	+0,00179	+0,00582	-0,01046	+0,00177	+0,00422	-0,00624
+0,00162	+0,00340	-0,01449	+0,00179	+0,00585	-0,00869	+0,00164	+0,00396	-0,00474
+0,00166	+0,00357	-0,01270	+0,00173	+0,00566	-0,00705	+0,00150	+0,00363	-0,00342
+0,00165	+0,00354	-0,01097	+0,00165	+0,00542	-0,00555	+0,00133	+0,00326	-0,00229
+0,00160	+0,00364	-0,00932	+0,00153	+0,00510	-0,00422	+0,00116	+0,00289	-0,00133
+0,00155	+0,00357	-0,00779	+0,00141	+0,00473	-0,00306	+0,00098	+0,00252	-0,00054
+0,00150	+0,00343	-0,00638	+0,00131	+0,00433	-0,00208	+0,00084	+0,00216	+0,00008
+0,00146	+0,00323	-0,00508	+0,00121	+0,00388	-0,00124	+0,00072	+0,00181	+0,00057
+0,00142	+0,00298	-0,00387	+0,00113	+0,00335	-0,00052	+0,00059	+0,00145	+0,00093
+0,00139	+0,00269	-0,00274	+0,00107	+0,00281	+0,00007	+0,00051	+0,00111	+0,00118
+0,00137	+0,00237	-0,00167	+0,00101	+0,00225	+0,00058	+0,00043	+0,00076	+0,00134
+0,00135	+0,00201	-0,00066	+0,00097	+0,00167	+0,00101	+0,00038	+0,00043	+0,00144
+0,00133	+0,00163	+0,00031	+0,00095	+0,00108	+0,00139	+0,00034	+0,00009	+0,00148
+0,00133	+0,00125	+0,00126	+0,00093	+0,00047	+0,00173	+0,00032	-0,00024	+0,00149
	+0,00085	+0,00219		-0,00014	+0,00205		-0,00058	+0,00148

следует подсчитывать по закону прямой (к нулю на крайней опоре, соответственно черт. 16).



# СПИСОК

## трудов, выпущенных Научно-Техническим Комитетом НКПС с 1918 г.

### А. Труды Экспериментального Института Путей Сообщения 1918—1919 гг.

1. Бюллетень. Выпуск I. Задачи Экспериментального Института П. С.—Положение об Эксп. Инст.—Совет Института.—Программа деятельности (1918 г.) (разошлось).
2. Выпуск I. Популярно-техническая часть. Введение в изучение свойств железа. А. Н. Митинский. 1918 г. (разошлось).
3. Выпуск II. Популярно-техническая часть.—Клалан М. П. Савелова для золотников Трика и отчет об его испытании. 1918 г. (разошлось).
4. История развития путей сообщения и современ. состояние мирового ж.-д. транспорта.
5. Инж. Б. Д. Воскресенский. 1918 г.
6. Бюллетень № 2.—Задачи и программы работ Института. 1919 г. (разошлось).
7. Бюллетень № 3.—„Спротивление товарных поездов движению и зависимость его от веса вагонов“. Э. К. Шмидт. 1919 г. (разошлось).
8. Бюллетень № 4.—„Отопление угольной пылью и значение этого способа для использования русских углей“. Инж. Э. П. Цезаревич. 1919 г. (разошлось).
9. Бюллетень № 5.—„Отопление торфом паровозов и стационарных котлов“. Инж. А. Н. Шелест. 1919 г.
10. Бюллетень № 6.—„Пассажиры и товарное движение на германских жел. дорогах в последние годы перед мировой войной“. Инж. Б. Д. Воскресенский. 1919 г.
11. Бюллетень № 7.—„Американская автом. сцепка ваг.“ Вып. I. Э. П. Цезаревич. 1919 г.
12. Бюллетень № 8.—„Справочник по паровозам завода Балдвина“. Инж. П. О. Красовский и В. Ф. Егорченко. 1919 г.
13. Бюллетень № 9.—„Проблема профиля и трассы железных дорог“. Часть I. Основные начала механики железнодорожного транспорта. Инж. Б. Д. Воскресенский и Д. Д. Будапов. Отдельные методы—профессоров: Н. Е. Жуковского, С. А. Чаплыгина, А. П. Полякова и инж. М. М. Филоенко-Бородича. 1919 г.
14. Бюллетень № 12.—„Каким должен быть идеальный трейнмастер на американских железных дорогах (начальник движения Линейного Отдела американских железных дорог)“. Премированные статьи на конкурсе журн. The Railroad Age Gazette. New-York. 1909 г., перевод под редакцией инж. Б. Д. Воскресенского.
15. Бюллетень № 13.—„Проблема профиля и трассы железных дорог“. Часть I-6. Основные начала механики железнодорожного транспорта. Инж. Б. Д. Воскресенский и Д. Д. Будапов. Отдельные методы и статьи—профессоров: Н. Е. Жуковского, С. А. Чаплыгина и инж. Э. П. Цезаревича и П. О. Красовского. 1919 г.
16. Бюллетень № 32.—„Наука о производительности и техническое образование“ Инж. Э. П. Цезаревич. 1919 г.

### Б.—Труды Технического Комитета НКПС 1920—1922 гг.

16. Бюллетень № 34.—Опытная дорога при Ораниенбурге. Перевод М. Г. Лорх, под редакцией инж. Б. Д. Воскресенского. 1920 г.
17. Правила технической эксплуатации ж. д., открытых для общего пользования 1924 г.
18. Правила и нормы для проектирования железобетонных сооружений 1924 г.
19. В. Е. Тимонов.—О Петроградском узле путей сообщения в связи с вопросом развития и улучшения порта. 1920 г.
- 19 а. Известия Центральной станции по испытанию металлов. Вып. I. Труды Комиссии по антифрикционным силам для жел. дор. 1920—1922 гг. Под ред. проф. А. В. Сапожникова.
- 19 б. Инж. С. Н. Масленников.—„Результаты обследования работы на станках в железнодорожных паровозных мастерских (1912—1916 гг.)“. 1920 г.

Примечание. Бюллетени за №№ 10—11, 14—31 и 33 не вышли из печати и материалы, подготовленные для них, были частично опубликованы в журнале „Техника и Экономика П. С.“.

### В.—Труды Высшего Технического Комитета НКПС 1922—1923 гг.

20. Технические условия производства бетонных и железобетонных работ.
21. Характер, больш. ремонта паровоз. и установление предельн. норм износа частей.
22. Труды XVII Советат. Съезда Начальников Служб Связи и Электротехники 1922 г.
23. Краткий обзор работ, резолюции и постановления 2-го Всероссийского Советательного Съезда по Холодильному делу на путях сообщения. 1922 г.
24. Справочник по паровозам Американской Паровозной Компании. П. О. Красовский и В. Ф. Егорченко. 1922 г.
25. Труды Комитета по оборудованию русского подвижного состава американской сцепкой
26. Дополнения к Правилам Технической Эксплуатации железных дорог. 1922 г.
27. Труды Мостовой Подсекции и Бюро Мостовых Исследований. Сборник № 1. Вопросы деревянного мостостроения. 1923 г.
28. Труды Мостовой Подсекции и Бюро Мост. Исслед.—Сборник № 2. Таблицы для расч. металлических, железобетонных, бетонных и каменных мостов по нагрузкам. 1921 г.
29. Труды XXXIII Советательного Съезда Начальников Сл. Пути. 1923 г.
30. Труды XXXIII Советательного Съезда инженеров Службы Тяги. 1923 г.

31. Проф. Н. С. Стрелецкий. — К расчету сложных статически-неопределимых систем. 1922 г.
32. И. М. Рабинович. — Применение теории конечных разностей к исследованию неравноразных балок.
33. Проф. М. М. Филоненко-Бородич. — Общее решение системы основных уравнений для неразрезных балок.

### Г.—Труды Научно-Технического Комитета НКПС 1923—1924 гг.

34. Сборник трудов по железобетонному судостроению. Вып. I. 1923 г.
35. Сборник трудов № 3 Бюро Мостовых Исследований и Мостовой Подсекции НТК. — Вопросы исследования металлических мостов. 1923 г. (разошлось).
36. Описание Муромских мастерских Московско-Казанской ж. д. 1923 г.
37. Альбом по градации размеров выношенных частей паровозов. 1923 г.
38. Труды Комиссии по нефтяному топливу и смазочным материалам (под редакцией проф. А. В. Сапожникова). 1923 г.
39. Эксплуатационные паспорта паровозов типа Ов' Э и С. 1923 г.
40. Наблюдательно-аналитический метод определения расхода топлива паровозами (Гриненко, Попов и Исаакьян). 1923 г.
41. Паспортные книжки паровоза 0—4—0. 1924 г.

### Д.—Периодические издания.

- „Бюллетень Международной Сессии Высшего Технического Совета“ за 1918—1919 гг.  
 „Техника и Экономика П. С.“ за 1919, 1920, 1921, 1922, 1923 и 1924 гг.  
 „Электротехника и Связь на Пути Сообщения“. 1923 и 1924 гг.  
 „ИЗУЛ“—1921 г.  
 „Транспорт“ за 1922 и 1923 гг.  
 „Подвижной состав, тяга и мастерские“ за 1923 и 1924 гг.  
 „Технический Журнал НКПС“ за 1923 г.  
 „Холодильное дело на путях сообщения“ за 1923 и 1924 гг.  
 „Водный Транспорт“ за 1923, 1924, 1925, 1926 и 1927 гг.  
 Примечание. Все периодические издания, кроме жур. „Водный транспорт“, прекращены и разошлись.

### Е.—Труды Научно-Технического Комитета с 1924 г.

- Вып. № 1. Отчет Научно-Технического Комитета НКПС о деятельности за время с 1 октября 1922 г. по 1 октября 1923 г. (разошлось).
- „ № 2. Отчет Научно-Техн. Комитета о деятельности за время с 1 октября 1923 г. по 1 октября 1924 г. (разошлось).
- „ № 3. Динамометрические и теплотехнические испытания на Приладожских каналах в 1923 г.—1 р. 50 к.
- „ № 4. Сборник трудов НТК по холодному водному транспорту. 1925 г.—2 р. 20 к.
- „ № 5. Изучение ледокольного дела в морских портах СССР.—2 р. 50 к.
- „ № 6. В. Ф. Егорченков.—Расчет количества тормозных осей в товарных поездах на ручных тормозах. 1925 г.—10 к.
- „ № 7. Четвертый сборник Бюро Инженерных Исследований. 1925 г.—3 р.
- „ № 8. Технические условия проектирования и сооружения магистральных жел. дорог нормального типа. 1925 г.—80 к. (разошлось)
- „ № 9. Непрерывные тормоза для товарных поездов. 1925 г.—1 р. 20 к.
- „ № 10. Р. П. Гриненко и С. П. Сыромятников. Подогрев питательной воды на паровозах.—1 р. 50 к.
- „ № 11. Проф. С. П. Сыромятников. Испытание шахтной кровельной паровозной топки.—90 к.
- „ № 12. Памяти проф. Н. Л. Щукина.—75 к.
- „ № 13. Пятый сборник Бюро Инженерных Исследований.—3 р.
- „ № 14. Срок службы телеграфных проводов.—1 р.
- „ № 15. Вопросы эксплуатации.—1 р.
- „ № 16. Динамометрические и теплотехнические испытания на р. Неве в 1924 г.—1 р. 20 к.
- „ № 17. Шестой сборник Бюро Инженерных Исследований—3 р.
- „ № 18. Пропитка шпал. IV вып.—1 р.
- „ № 19. Результаты испытаний различных систем изоляций паровозных котлов.—50 к.
- „ № 20. Столетие железных дорог.—2 р. 50 к.
- „ № 21. Габарит приближения строений к пути и подвижного состава.—90 к.
- „ № 22. Испытания судов и землечерпательных сварядов на Приладожских каналах в 1925 г.—70 к.
- „ № 23. Расчеты пути.—90 к.
- „ № 24. Сборник материалов по тепловозам.—1 р. 20 к.
- „ № 25. Таблицы для расчета ж.-д. мостов по нормам 1925 г. Седьмой сборник Бюро Инженерных Исследований—80 к.
- „ № 26. Нормы притока ливневых вод к искусственным сооружениям.—1 р. (разошлось).
- „ № 27. Исследования рессорной стали и мостового железа.—1 р. 25 к.
- „ № 28. Обзор работ НТК за время с 1/X—1924 г. по 1/X—1925 г.
- „ № 29. Нормы проектирования и сооружения мостов (металлических, деревянных каменных и бетонных).—1 р. 20 к. (разошлось).

- Вып. № 30. Проф. Н. С. Стрелецкий. Законы изменения веса металлических мостов. Восьмой сборник Бюро Инженерных Исследований.—1 р. 50 к. (разошлось).
- № 31. Проф. Е. В. Влиивик. Водное строительство в Баварии.—80 к.
- № 32. XIV Международный Судостроительный Конгресс 1926 г. в Калре (Докл. русск. яз.)—4 р.
- № 33. Испытание пароходов на Черном море.—1 р. 20 к.
- № 34. Результаты испытания подогревателей.—1 р.
- № 35. Исследование деформаций металлов пролетных строений под грачевой нагрузкой. Девятый сборник Бюро Инженерных Исследований.—2 р. 50 к.
- № 36. Материалы по железобетонному судостроению. Второй сборник.—2 р.
- № 37. Парафинистый мазут, как топливо для паровозов. 2 р. 50 к.
- № 38. Временные Технические Условия и нормы проектирования и возведения жел.-бет. сооружений.—1 р. (разошлось).
- № 39. Свод нивелировок железных дорог Европейской части СССР.—2 р. 50 к.
- № 40. Напряженное состояние мостовых ферм и опытные исследования. Десятый Сборник Отдела Инж. Исследований.—2 р. 50 к.
- № 41. Технические условия проектирования станций.—60 к. (разошлось)
- № 42. Материалы к пересмотру технических условий на рельсы.—3 р. 50 к.
- № 43. Борьба с котельной накипью.—50 к.
- № 44. Результаты конкурса по механизации путевых работ.—1 р. 20 к.
- № 45. Исследование вопроса об отжиге котельного железа после прокатки.—2 р. 50 к.
- № 46. Положение по составлению проектов тяговых устройств. Цена 60 к.
- № 47. Материалы по классификации жел. дор. Часть I.—2 р.
- № 48. Traavaux d'étude sur bateaux à propulsion. (К XIV Межд. Судостроит. Съезду).
- № 49. Нормализация и стандартизация на транспорте. Т. I.—80 к.
- № 50. Парафинистый мазут, как топливо для паровозов. Часть II.—1 р. 50 к.
- № 51. Испытания буксир. теплоходов на Астрахан. рейде Каспийского моря.—1 р. 50 к.
- № 52. Сравнительное испытание углей марок Ф и Пж на пароходе „Чичерин“.—50 к.
- № 53. Способы перевозки парафинистого мазута (двустерны с изоляцией и с подогреванием).—80 к.
- № 54. Расчеты пути. Часть II.—2 р.
- № 55. Унифицированные методы химических испытаний.—1 руб.
- № 56. Динамические исследования мостов. Сборник № 11 Отд. Инж. Исслед. Ц. 2 р. 50 к.
- № 57. Пропитка шпал. V выпуск.—1 р. 50 к.
- № 58. Результаты испытания смазок и нефти.—80 к.
- № 59. Результаты испытания антрацитовых штыбов.—1 р. 50 к.
- № 60. Исследование напряжений и деформаций при статической работе моста Сборник № 12 Отд. Инж. Исслед.—3 р.
- № 61. Результаты опытов над паровозами серии СУ и Л.—2 р. 50 к.
- № 62. Результаты опытов над паровозом серии ЩЧ.—1 р. 50 к.
- № 63. Вопросы динамики мостов. Сборник № 13 Отд. Инж. Исслед. Ц. 2 р.
- № 64. Длина тормозных путей с точки зрения эксплуатации. Ц. 1 р.
- № 65. Кальциевые баббиты.—1 р. 50 к.
- № 66. Методика испытания мостов. Сборник № 14 Отд. Инж. Исслед.—2 р. 75 к.
- № 67. Материалы к унифицированию ширины колеи подвезных путей. 75 к.
- № 68. Методика металлургических испытаний металлов на транспорте 2 р. 75 к.
- № 69. Водное строительство и судоходство в Египте и Италии.—2 р.
- № 70. Определение деформаций и напряжений корпуса нефтеналивных судов „Азиефть“ и „Прознефть“ XV Сбор. Отд. Инж. Иссл.—1 руб.
- № 71. Пуццолановые цементы.—2 р. 50 к.
- № 72. Техн. Услов. на магистрали облегченного типа и на вионерные ж. д. 1 р.
- № 73. Краски и лаки.—1 р. 50 к.
- № 74. Материалы по классификации ж. д. Ч. II.—2 р. 50 к.
- № 75. Исследование рельсового дела в СССР. Ч. I.—3 р.
- № 76. Цель и метод испытания судов.—1 руб.
- № 77. Результаты испытания буксирных пароходов на Каспийском море.
- № 78. Сжигание мазутов в паровой топке.—80 к.
- № 79. Анализ работы проезжей части мостовых пролетных строений.—XVI Сбор. Отд. Инж. Иссл.—2 р. 50 к.
- № 80. Консервирование дерева.—1 р. 25 к.
- № 81. Температурное влияние на работу мостовых пролетных строений.—XVII Сбор. Отд. Инж. Иссл.
- № 82. Тепло-технические исследования на водном транспорте.
- № 83. Расчеты пропускной способности станций.
- № 84. Исследование работы льда в ледяных переправах.—XVIII Сбор. Отд. Инж. Иссл.
- № 85. Исследование работы рельса и рельсовой накладки.—XIX Сбор. Отд. Инж. Иссл.—2 р.
- № 86. Нормы притока ливневых вод к искусственным сооружениям.—2-й Сбор. 1 р. 50 к.
- № 87. Исследование железобетонных сооружений.—XX Сбор. Отд. Инж. Иссл.—1 р. 25 к.