

инженер Смоляницкий Л.А.

ИССЛЕДОВАНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ СТАБИЛИЗАЦИИ ОСНОВНОЙ  
ПЛОЩАДКИ ЗЕМЛЯНОГО ПОЛОТНА МЕТОДОМ ЦЕМЕНТАЦИИ  
ИНЪЕКЦИЕЙ И ПОДБАЛКАСТНЫМИ ПЛИТАМИ

(специальность № 48I - основания, фундаменты  
и подземные сооружения)

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Днепропетровск

1 9 6 9

инженер Смоляницкий Л.А.

ИССЛЕДОВАНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ СТАБИЛИЗАЦИИ ОСНОВНОЙ  
ПЛОЩАДКИ ЗЕМЛЯНОГО ПОЛОТНА МЕТОДОМ ЦЕМЕНТАЦИИ  
ИНЪЕКЦИЕЙ И ПОДБАЛЛАСТНЫМИ ПЛИТАМИ

(специальность № 481 - основания, фундаменты  
и подземные сооружения)

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Научный Руководитель -  
доктор технических наук,  
профессор М.Н.Гольдштейн

Днепропетровск

1 9 6 9

Работа выполнена в Днепропетровском институте инженеров железнодорожного транспорта.

Научный Руководитель - доктор технических наук, профессор  
М.Н.ГОЛЬДШТЕЙН

Официальные оппоненты - доктор технических наук, профессор  
А.Я.ТУЛАЕВ, кандидат технических наук  
В.П.ТИТОВ

Предущее предприятие - Служба пути Львовской железной  
дороги.

Автореферат разослан 16 февраля 1970 г.

Защита диссертации состоится 19 марта 19 70 г.  
на заседании Ученого Совета Днепропетровского института инженеров железнодорожного транспорта.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке института.

Просим Вас и сотрудников Вашего учреждения, интересующихся темой диссертации, принять участие в заседании Ученого Совета или прислать свои отзывы о работе по адресу:

г.Днепропетровск-10, ул.Университетская, 2, Институт инженеров железнодорожного транспорта, Ученый Совет.

## ВВЕДЕНИЕ

Недостаточная устойчивость земляного полотна железнодорожного пути на ряде участков препятствует повышению скорости движения поездов. Поэтому проблема стабилизации земляного полотна имеет огромное значение. Одной из весьма распространенных болезней основной площадки земляного полотна является развитие балластных углублений. Известно (Н.Г.Грушевой, М.Н. Клевцов и К.С.Ордунянц, Л.С.Лапидус, Г.М.Шахунянец и др.), что балластные углубления возникают и развиваются при следующих типах деформаций основной площадки:

- а) осадка основной площадки за счет уплотнения грунта поездной нагрузкой,
- б) проникновение балласта в разжиженный грунт, сопровождающееся его выдавливанием в поры балласта (так называемая диффузия балласта в грунт),
- в) пластическое выдавливание грунта земляного полотна на откосы и в кюветы (расползание основной площадки). Этот тип деформаций был впервые выделен проф.Г.М.Шахунянцем.

Иногда пластическое выдавливание грунта основной площадки сопровождается диффузией.

Наиболее опасным типом деформаций является расползание грунта основной площадки, постепенно приводящее к развитию глубоких балластных лож и мешков, которые являются причиной постоянных просадок пути, а в ряде случаев — мгновенных смещений значительных масс грунта тела насыпей.

Одними из наиболее прогрессивных методов стабилизации балластных углублений являются инъекция цементного раствора

и укладка подбалластных плит, которые позволяют механизировать производство работ с выполнением их в кратчайшие сроки; в ряде случаев они являются единственно эффективными методами стабилизации.

### 1. Состояние вопроса

Метод инъекции цементного раствора в балластные ложа для их стабилизации впервые начали применять в США (Американская железнодорожная энциклопедия, Н.Г.Грушевой, Т.Г.Яковлев, Р.Смит и Р.Пек). Позднее он получил распространение в Англии (В.И.Модейко, „*Railway gaz*“, 1964, 1965), в Румынии (М.Берку, И.Корнфельд), в Чехословакии (П.Тыц, К.Хунек, Скленаар, С.Брабек, И.Краус, И.Стрейт, А.Везелка), во Франции (Тред и Алис, „*Vie rail*“, 1966), в ФРГ (А.Бетхаузер, Х.Руммели и К.Хирсак; О.Вагнер), в Болгарии (Стойчев) и в других странах. Проводились опыты по нагнетанию цементного раствора и на дорогах СССР (Н.Г.Грушевой).

Подбалластные плиты впервые были уложены в России в 1909 г. инж. Долгимым. В США их начали укладывать в 1919-1920 годах, а позднее в Англии, Голландии, Чехословакии и в СССР (Н.Г.Грушевой, Булл.Т.Э.инф., 1965 г., Скленаар и Худек).

В некоторых случаях эти методы стабилизации оказывались неэффективными или недостаточно эффективными. Не были в достаточной степени изучены стабилизирующие факторы цементации (омоноличивание балластного углубления) и подбалластных плит и они выполнялись при различных деформациях земляного полотна без предварительного расчета.

Предположения указанных выше авторов о стабилизирующих факторах омоноличенной зоны балластного углубления и подбалластных плит сводились к следующему: а) омоноличенная зона и плиты распределяют нагрузку от поезда на большую площадь, б) омоноличенная зона, являясь гидроизоляцией, препятствует проникновению воды в балластное углубление, в) оба указанных фактора равноценны. В основном исследовалась технология приготовления и нагнетания раствора, причем общий принцип его состава в зависимости от заполнителя балластного углубления разработан не был.

О.М.Резниковым было высказано предположение, согласно которому стабилизирующий эффект подбалластных плит (и омоноличенной зоны) объясняется включением в работу большего массива грунта за счет возможности деформирования по новым более длинным поверхностям скольжения, им был дан приближенный расчет необходимой ширины подбалластных плит, однако без учета балласта.

В предлагаемой работе приведены результаты теоретических и экспериментальных исследований влияния омоноличенной зоны и подбалластных плит на несущую способность земляного полотна с учетом работы балластного слоя, на влажностный режим грунта земляного полотна, на жесткость пути. Исследовались свойства цементных растворов и условия их нагнетания в заполнитель балластного углубления, а также некоторые другие сопутствующие вопросы.

Целью исследований являлась разработка метода расчета омоноличенной зоны балластного углубления и подбалластных плит для их проектирования.

## 2. Исследование работы омоноличенной зоны балластного углубления и подбалластных плит и их влияния на несущую способность земляного полотна.

Работа омоноличенной зоны и подбалластных плит исследовалась теоретически и экспериментально на моделях земляного полотна и на действующем пути.

### А. Теоретическое решение

В основу теоретического решения положена гипотеза О.М. Резникова о пластическом деформировании двухслойного (балласт, грунт земляного полотна) основания рельсо-шпальной решетки, согласно которой в двухслойном основании образуются единые поверхности скольжения, начинающиеся от торцов шпал подбалластной плиты или омоноличенной зоны, пересекающие балласт и переходящие в грунт земляного полотна. Нами количественная оценка влияния омоноличенной зоны или плит на несущую способность земляного полотна выполнялась путем сравнения несущей способности земляного полотна до и после выполнения этих мероприятий. (Задача о несущей способности земляного полотна ранее была решена Л.С. Лапидусом, однако это решение при развитом балластном углублении не может быть использовано, так как согласно ему работа балласта заключается только в распределении поездной нагрузки на большую ширину по основной площадке).

Несущую способность земляного полотна выразим уравнением

$$P = 2 b c \psi \quad (I)$$

где  $P$  - искомая погонная нагрузка

$2b$  - полуширина загруженной части основной площадки  
(ширина плиты омоноличенной зоны или длина шпалы),

$c$  - сцепление грунта земляного полотна с учетом усталости при динамической нагрузке,

$\psi$  - некоторый безразмерный коэффициент пропорциональности, зависящий от ширины основной площадки, очертаний земляного полотна в поперечном разрезе, толщины слоя балласта и угла его внутреннего трения.

Минимальное значение  $\psi$  ищется вариационным методом с использованием некоторых допущений и предпосылок. Основные предпосылки и допущения следующие: а) грунт земляного полотна лишен внутреннего трения (это вполне приемлемо в случае глинистого водонасыщенного грунта, в котором чаще всего и развиваются балластные углубления), а балласт - сцепления; б) под загруженной областью образуется при нарушении предельного равновесия упругий клин, построение которого показано на рис. I; в) загруженная область в пределах земляного полотна ограничивается линиями  $MN$ , положение которых видно на рис. I; г) распределение вертикальных напряжений от острия упругого клина задается в виде функции  $q = \frac{\sqrt{x_i} - \sqrt{x}}{\sqrt{x_i}} q_0 \cos \alpha_i$ , где  $x$  - текущая координата, остальные обозначения показаны на рис. I.

Поверхности скольжения, рассчитанные при использовании указанной зависимости, довольно близко совпадают с наблюдае-



мыми в опытах на моделях земляного полотна.

В основу построения функционала, дающего уравнение поверхности скольжения, по которой действуют минимальные удерживающие силы, положен принцип возможных перемещений отсеков вдоль поверхности скольжения (равенство их горизонтальных перемещений) и равенство работ сдвигающих и удерживающих сил на перемещениях (объемные силы не учитываются), а взаимодействие отсеков учитывается косвенно принятой нами функцией распределения напряжений.

Функционал, составленный относительно выражения  $\frac{q_0}{c}$  которое мы и назовем  $\Psi$  имеет вид:

$$\frac{q_0}{c} = \Psi = \frac{\int_a^c (1 + y_a'^2) dx + \int_0^a (1 + y_a'^2) dx + \int_a^{x_2} (1 + y_{i2}'^2) dx}{\int_a^c (\sin \alpha_0 - \tan \varphi) dx - \int_0^a y_a' \cos \alpha_0 dx - \int_0^{x_2} y_{i2}' \frac{\sqrt{x_1} - \sqrt{x}}{\sqrt{x_1}} \cos \alpha_0 dx} \quad (2)$$

$\varphi$  - угол внутреннего трения балласта.

Используя интегральное и соответствующие граничные условия, нами были получены решения для насыпи, выемки и нулевого места (полупространство) в общем виде

$$\Psi = A \pm \sqrt{A^2 + B} \quad (3),$$

где  $A$  и  $B$  имеют следующие значения

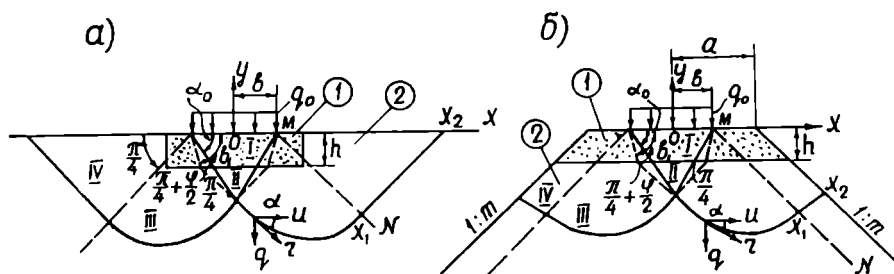


Рис. I. а) расчетная схема для нулевого места (полупространство)

б) расчетная схема для насыпи.

1) балласт, 2) глинистый грунт земляного полотна.

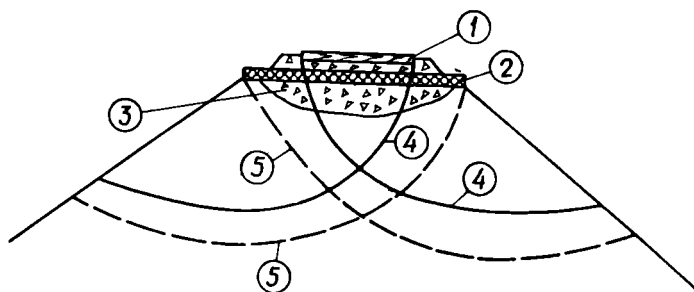


Рис.2. 1) шпала, 2) подбалластная плита.

3) омоноличенная зона, 4) поверхность скольжения до цементации или укладки подбалластных плит,

5) поверхность скольжения после цементации или укладки подбалластных плит

1. Для насыпи

$$A = \frac{194 M (n+l) \cos \alpha_0 + p t - (q + 2b_2) m \cos \alpha_0}{2 [m t \cos \alpha_0 - 0,252 (n+l) \cos^2 \alpha_0]} \quad (4)$$

$$B = \frac{p(q + 2b_2) - 6S(n+l)}{m t \cos \alpha_0 - 0,252 (n+l) \cos^2 \alpha_0}$$

2. Для нулевого места

$$A = \frac{[b_1(2-E) - 12b_2] \cos \alpha_0}{2 [0,252(b_1 - b_2) - b_2] \cos^2 \alpha_0} \quad (5)$$

$$B = \frac{12[2(b_1 - b_2) - b_1(2-E)]}{[0,252(b_1 - b_2) - b_2] \cos^2 \alpha_0}$$

3. Для выемки (поверхность скольжения выклинивается у дна кювета, т.е. точка  $X_2$  задана)

$$A = \frac{E b_1 - \{b_2 + 0,353[X_2 - L(a-b)]\} \cos \alpha_0}{0,084 [X_2 - L(a-b)] \cos^2 \alpha_0} \quad (6)$$

$$B = \frac{2b_2 - S X_2}{0,042 [X_2 - L(a-b)] \cos^2 \alpha_0}$$

Обозначения следующие:

$1.m$  - заложение откоса,  $h$  - толщина слоя балласта (глубина балластного ложа в месте пересечения его подошвы поверхностью скольжения),  $\varphi$  - угол внутреннего трения балласта.

$$p = b \sqrt{1+m^2}, \quad M = \frac{\sqrt{1+m^2}}{m} - 1, \quad \alpha_0 = \arctg \frac{b+h[1-\lg(45^\circ-\varphi_2/2)]}{b}$$

$$l = (a-b)\sqrt{1+M^2} - a, \quad L = \sqrt{\frac{1+M^2}{1+m^2}},$$

$$t = E b_1 - b_2 \cos \alpha_0, \quad E = \lg \varphi - S \sin \alpha_0, \quad y = S(a-b)L,$$

$$S = 1+M^2 \quad b_1 = \frac{b h}{b+h[1-\lg(45^\circ-\varphi_2/2)]}, \quad b_2 = b - b_1,$$

$$n = m \varphi_0 \quad \varphi_0 = -\{b+h[1-\lg(45^\circ-\varphi_2/2)]\}$$

Для первого и второго случаев построены номограммы по данным расчетов на ЭЦВМ "Проминь".

Поверхность скольжения (см. рис. I) в I-й и II-й областях нами была задана очертанием упругого ядра, в III-й области согласно решению она описывается полукубической параболой, а в IV-й - прямой, пересекающей горизонтальную поверхность (в случае нулевого места) под углом  $45^\circ - \frac{\gamma}{2}$ .

Задаваясь шириной омоноличенной зоны или подбалластной плиты, коэффициент устойчивости земляного полотна после осуществления одного из этих мероприятий выразится следующим отношением

$$\xi_1 = \frac{b_n \varphi_n}{b_g \varphi_g}, \quad (7)$$

где  $b_n$  - полуширина омоноличенной зоны (плиты),  $b_g$  - полуширина шпалы,  $\varphi_n$  и  $\varphi_g$  - значения функционала  $\varphi_{\sigma/c}$  соответственно после и до цементации или укладки плит.

Ширина омоноличенной зоны или плит должна быть такой, чтобы  $\xi_1 = \xi_0$ , где  $\xi_0$  - нормативный коэффициент запаса.  $\xi_0$  предлагается рассчитывать аналогично расчету коэффициента запаса ( $K_c$ ), предложенному в "Указаниях по проектированию земляного полотна автомобильных и железных дорог", 1967 г.

Предложенный расчет оценивает повышение несущей способности земляного полотна при омоноличивании заполнителя балластного углубления или при укладке подбалластных плит за счет деформирования по более длинным поверхностям скольжения (рис. 2).

При этом суммарное сопротивление сдвигу по новым поверх-

ностям скольжения превышает сопротивление сдвигу по старым поверхностям скольжения. Однако возможны случаи, когда в результате образования новых поверхностей скольжения исключается из работы значительная толща балласта и повышение несущей способности не достигается. Количественная оценка может быть выполнена только на основании расчета.

При деформациях типа диффузии, когда сравнительно тонкий слой грунта разупрочен до текучей консистенции (о чем свидетельствуют его выплески в балластную призму), подбалластные плиты не будут эффективными, так как разжиженный грунт сможет выдавливаться из-под них на обочины.

#### Б. Исследование деформаций земляного полотна на моделях.

С целью изучения характера деформаций земляного полотна и проверки теоретического решения были выполнены опыты в лабораторных условиях на моделях. Испытания моделей земляного полотна в масштабе 1 : 10 — 1 : 50 натуральных размеров выполнялись под динамической и статической нагрузками. Использовались динамические установки двух типов — электромагнитная и механическая. Частота загрузки моделей составляла 1 и 2,8 гц. В общей сложности было испытано более 30 моделей земляного полотна, изготовленных из суглинков и глин. В качестве балласта использовался крупнозернистый песок и дресва. В опытах фиксировалось расположение поверхностей скольжения, критическая нагрузка или скорость деформирования (при определенной нагрузке) при различной ширине штампов, омоноличенных зон балластного углубления, подбалластных плит, различных толщинах балласта.

Испытывались модели насыпей, выемок и полупространства.

Выполненные опыты подтвердили гипотезу о деформировании двухслойного основания пути (земляное полотно и балласт), согласно которой от торца жесткого элемента пути (шпалы, омоноличенной зоны, подбалластной плиты) развиваются единые поверхности скольжения, пересекающие балластный материал и грунт земляного полотна.

При укладке подбалластных плит (или при омоноличивании заполнителя балластного углубления) в опытах развивались новые поверхности скольжения, в результате чего повышалась несущая способность моделей земляного полотна. В нескольких опытах, когда толстый балластный слой полностью перекрывался плитами несущая способность моделей земляного полотна практически не повышалась.

Выполненные опыты качественно и количественно подтвердили результаты теоретического решения, а рассчитанные поверхности скольжения располагались весьма близко от наблюдаемых в опытах.

Некоторое повышение несущей способности земляного полотна моделей наблюдалось даже в тех случаях, когда подбалластная плита разрезалась в поперечном сечении на несколько частей, однако положительное влияние плит при этом сказывалось меньше.

### 3. Расчет омоноличенной зоны и подбалластных плит на прочность.

Подбалластные железобетонные плиты рекомендуется рассчитывать на прочность по существующим методам как балки на упругом основании. Прочность омоноличенной зоны балластного углуб-

ления должна быть обеспечена за счет достаточной толщины. Ряд авторов (М.С.Каримов, В.И.Тихомиров, А.Н.Марготьев) толщину грунтоцементного покрытия рекомендуют определять на основании ее распределяющей способности. Выполненный нами сравнительный расчет необходимой толщины омоноличенной зоны, определенной из условия ее распределяющей способности (по методу эквивалентного слоя Г.И.Покровского) и из условия работы на изгиб показал, что условие работы на изгиб требует большую толщину омоноличенной зоны. Необходимая толщина омоноличенной зоны может быть рассчитана из условия ее работы на изгиб с некоторым запасом по предлагаемой нами приближенной теоретической формуле

$$H_{ом} = 0,166 \sum_n \sqrt{q_n}, \quad (8)$$

где  $q_n$  - поездная нагрузка,  $H_{ом}$  - искомая толщина в наиболее опасных сечениях (по оси пути и под рельсами).

#### 4. Влияние омоноличенной зоны и подбалластных плит на напряженное состояние земляного полотна.

На трех участках действующего пути Львовской ж.д., в пределах которых была выполнена цементация балластного углубления или уложены подбалластные ж.б. плиты, нами с помощью мессдоз конструкции ЦНИИС МПС измерялись контактные напряжения под подошвой омоноличенной зоны до и после цементации, а также под плитами и на контрольном рядом расположенном участке на той же глубине. Эти измерения показали, что контактные напряжения в поперечном сечении земляного полотна под омоноличенной зоной или под плитами распределяются более равномерно - максимальные

напряжения в сечениях рельсовых нитей уменьшаются. Проведенные нами опыты подтвердили результаты исследований М.С.Каримова и В.И.Тихомирова, произведенные в лабораторных условиях.

#### 5. Влияние омоноличенной зоны балластного углубления и подбалластных плит на жесткость пути.

Эти исследования выполнялись на действующем пути Львовской ж.д. и на моделях земляного полотна. Влияние омоноличенной зоны балластного углубления и подбалластных плит на жесткость пути в полевых условиях оценивалось косвенно по величине суммарных упругих деформаций под поездом основания рельсошпальной решетки (земляного полотна и балласта).

Для измерения упругих деформаций нами был сконструирован специальный оптический прибор, состоящий из двух отдельных частей - оптической шкалы, устанавливаемой в шпальном ящике в верхней зоне балластной призмы и трубы фиксации, которая устанавливается на некотором удалении от земляного полотна и с помощью которой фиксируются упругие смещения оптической шкалы при проходе поезда. Прибор позволяет фиксировать упругие деформации с точностью до 0,02 мм. Сравнение упругих деформаций основания рельсошпальной решетки на участках с омоноличенными балластными углублениями и подбалластными плитами с упругими деформациями на расположенных рядом контрольных участках без омоноличенной зоны и подбалластных плит показало, что в обоих случаях упругие деформации практически одинаковы.

Эти опыты согласуются с результатами измерений, выполненных В.И.Тихомировым, а также специалистами в ФРГ, которыми



было установлено, что основная доля упругих деформаций основания рельсо-шпальной решетки приходится на балластную призму.

Лабораторные опыты на моделях земляного полотна показали, что при нормальной толщине балластного слоя на плитах жесткость пути повышается весьма незначительно, о чем косвенно можно судить на основании сравнения величин измеренных изгибающих моментов в моделях шпал при различной толщине балласта над плитами и при отсутствии плит.

#### 6. Наблюдения за влажностным режимом грунта под омоноличенной зоной балластных углублений.

Рядом авторов (М.Берку, П.Тыц) высказывалось предположение о том, что одним из стабилизирующих факторов омоноличенной зоны балластных углублений, созданной инъекцией цементного раствора являются её гидроизоляционные свойства, способствующие предохранению грунта земляного полотна от увлажнения атмосферными осадками.

М.С.Каримовым, В.И.Тихомировым и др. было установлено, что под водонепроницаемыми покрытиями влажность грунта земляного полотна постепенно уменьшается. Полевые опыты Блэка, Кроней и др. показали, что влажность грунта изменяется только вблизи края водонепроницаемого покрытия.

С целью изучения влажностного режима грунта под омоноличенной зоной нами в течение двух лет на трех опытных участках отбирались пробы грунта на влажность под омоноличенной зоной вблизи ее подошвы и на такой же глубине - на контрольных участках. Наблюдения показали колебания влажности грунта в

в различные сезоны года, как под омоноличенной зоной, так и на контрольных участках. Однако тенденция к снижению влажности грунта земляного полотна под омоноличенной зоной замечена не была.

#### 7. Условия нагнетания цементного раствора в балластное углубление.

Возможность нагнетания цементного раствора в балластное углубление определяется фильтрационными свойствами заполнителя балластного углубления и условиями нагнетания. Минимальный коэффициент фильтрации заполнителя балластного углубления, при котором еще распространяется цементный раствор, составляет 100-200 м/сутки. Под условиями нагнетания подразумевается геометрический и гидравлический критерий. Согласно геометрическому критерию размеры пор цементируемого материала должны в 5-10 раз превышать размеры взвешенных частиц раствора. Гидравлический критерий требует турбулентного режима нагнетания.

Опытами в специальной лотке нами было установлено, что интенсивное осаждение цементных частиц, соответствующее нарушению турбулентного режима нагнетания, может быть оценено критерием М.Д.Миллионщикова, которое в наших обозначениях примет вид:

$$R_n = 19,4 H \left( \frac{K_{\phi}}{\lambda} \right)^3 \text{ см} \quad (9)$$

где  $R_n$  - расстояние от инжектора до фронта потока, соответствующее окончанию турбулентного, т.е. началу переходного режима фильтрации,  $H$  - напор, создаваемый насосом (см),

$K_{\phi}$  - коэффициент фильтрации инъецируемого материала (см/сек),

$\lambda$  - относительная кинематическая вязкость раствора. Задаваясь расстоянием между инъекторами в два шпальных ящика, критерием наступления переходного режима фильтрации по М.Д. Миллиончикову, реальным напором нагнетания ( $\approx 4$  атм), а также учитывая возможность разуплотнения цементируемого материала при нагнетании раствора, которое оценено нами на основании полевых опытов, получена формула для подбора оптимальной вязкости раствора

$$\lambda \approx 30 K_{\phi}, \quad (10)$$

где  $K_{\phi}$  - в см/сек. Величина  $\lambda$  обеспечивается соответствующим составом раствора.

#### 8. Исследование некоторых свойств цементных растворов, используемых для нагнетания в балластные углубления.

Основные свойства цементных растворов (вязкость, объемный вес, прочность при схватывании) в значительной мере зависят от удельной поверхности цементных частиц, водоцементного отношения раствора, количества инертных и активных добавок, технологии приготовления раствора. Нами изучалось влияние аэрирующего агента (сульфоната "Прогресс") при различном водоцементном отношении и различных добавках песка на объемный вес, вязкость, морозостойкость, прочность растворов. Кроме того исследовалась вязкость неаэрированных растворов в специально сконструированном вискозиметре.

Опыты показали, что оптимальной является добавка реагента сульфоната "Прогресс-30" I-I, 5% от веса цемента. Было установ-

лено, что бетон, приготовленный на азрированном растворе, практически водонепроницаем и обладает высокой морозостойкостью. Азрированные растворы обладают меньшей вязкостью и меньшим объемным весом, чем неазрированные, но являются более устойчивыми против расслоения. Свойства затвердевшего азрированного раствора и бетона в значительной степени зависят от возможности оттока лишней воды из раствора после его нагнетания в заполнитель балластного углубления.

#### 9. Определение коэффициента фильтрации заполнителя балластного углубления.

Как следует из п.7, для правильного подбора состава цементного раствора, необходимо знать коэффициент фильтрации заполнителя балластного углубления. Нами для определения коэффициента фильтрации заполнителя балластного углубления непосредственно на железнодорожном пути был сконструирован на базе инжектора специальный полевой фильтрационный прибор.

#### 10. Влияние динамики от поездной нагрузки на схватывание и твердение омоноличенной зоны.

Исследованиями В.И.Сорокера, Е.И.Ариели, И.Н.Ахвердова, А.Е.Десова и других установлено, что прочность бетона повышается при его периодическом вибрировании в процессе схватывания и твердения. Упрочнение омоноличенного цементным раствором заполнителя балластного углубления показало, что цементация может выполняться без закрытия перегона и ограничения скорости движения поездов.

#### 11. Численные характеристики растворов и расчеты необходимого количества материалов для стабилизации инъекцией балластных углублений.

Для расчета необходимого количества материалов для цемен-

тации нами использована объемная концентрация раствора ( $\mathcal{D}$ ), которая выражает долю твердых частиц в единице объема раствора. Выражение для объемной концентрации аэрированного раствора (наиболее сложный случай) получено в следующем виде:

$$\mathcal{D} = \frac{\rho_c^y \rho_n + \rho_c^n \rho_u \pi}{\rho_c^y \rho_n + \rho_c^n \rho_u \pi + \delta \rho_u \rho_n + \frac{w}{100} \rho_c^n \rho_u \rho_n \pi \left(1 + \frac{\delta}{\rho_n}\right) \rho_u \rho_n} \quad (II)$$

где  $\rho_c^y$ ,  $\rho_c^n$  - плотности рассыпного цемента и песка соответственно,

$\rho_u$ ,  $\rho_n$  - удельные веса цемента и песка,

$\delta$  - водоцементное отношение раствора,

$w$  - влажность добавляемого в раствор песка в %,

$\pi$  - добавка песка в долях объема цемента,

$\rho_u$ ,  $\rho_n$  - объемные веса неаэрированного и аэрированного растворов.

Для  $\rho_u$  получено аналитическое выражение, а для  $\rho_n$  построены номограммы на основании лабораторных испытаний.

## 12. Опытные работы на действующем пути.

На действующем пути Львовской ж.д. в 1965-1968 г.г. нами были заложены восемь опытных участков, из них семь участков с цементацией и один с плитами (по предложению к.т.н.О.М.Резникова). Опытная стабилизация балластных углублений на трех участках Одесско-Кишиневской ж.д. в 1966 г. была выполнена инж.В.М.Мишаловым. Кроме того, для проверки теоретического решения использованы материалы опытной стабилизации земляного полотна методом цементации инъекцией на ж.д. Румынии по данным м.Берку. Опытные работы на действующем пути подтвердили теоретические и лабораторные исследования.

## ВЫВОДЫ

Выполненные исследования позволяют сделать следующие выводы:

1. Стабилизация основной площадки земляного полотна ~~омоноличиванием заполнителя~~ балластного углубления и подбалластными плитами может быть эффективной, если омоноличенная зона и подбалластные плиты имеют достаточную ширину. В сложных инженерно-геологических условиях укладка плит и цементация должны выполняться в комплексе с другими стабилизирующими мероприятиями.

2. Предложенный метод расчета позволяет оценить изменение несущей способности земляного полотна при цементации и укладке подбалластных плит и обоснованно проектировать их ширину.

3. Стабилизация основной площадки омоноличиванием ~~заполнителя~~ балластного углубления и подбалластными плитами является эффективной, когда деформации вызваны расползанием земляного полотна.

4. Повышение несущей способности земляного полотна при выполнении этих мероприятий объясняется вовлечением в работу большего массива грунта, при этом увеличивается общее сопротивление сдвигу за счет возможности деформирования по более длинным поверхностям скольжения.

5. Омоноличенная зона и плиты более равномерно распределяют напряжения на основной площадке.

6. Гидроизоляционные свойства омоноличенной зоны существенной роли не играют.

7. Распространение цементного раствора успешно осуществляется при выполнении требуемых геометрических соотношений

размеров пор и цементных частиц и при обеспечении турбулентного режима нагнетания раствора.

8. Качество раствора повышается при его аэрации. При этом достигается экономия цемента. В качестве аэрирующей добавки может быть использован сульфонал "Прогресс" в количестве I-I,5% от веса цемента.

9. Схватывание и твердение нагнетенного в балластное углубление цементного раствора успешно происходит при движении поездов, поэтому при выполнении цементации не требуется закрытие перегона и ограничение скорости движения.

10. Омоноличенная зона и подбалластные плиты практически не увеличивают жесткость пути.

Список работ автора, в которых опубликованы материалы  
диссертации.

1. Об эффективности некоторых методов лечения балластных корыт. Сборник ДИИТа "Вопросы геотехники" № 9, под ред. проф. М.Н. Гольдштейна, Москва, Транспорт, 1965 (совместно с И.М. Меркуловым).
2. Борьба с деформациями на участках, пораженных балластными углублениями, глава 3 в сб. ДИИТа "Вопросы геотехники" № II, под ред. проф. М.Н. Гольдштейна, Москва, Транспорт, 1967 (совместно с О.М. Резниковым, М.А. Раскиным, В.С. Боголюбчиком).
3. Стабилизация балластных корыт методом цементации. Тезисы докладов ХУП научно-технической конференции ДИИТа, Днепропетровск, 1967 (совместно с В.М. Мишаловым, А.В. Реульцом).
4. К вопросу стабилизации земляного полотна методом цементации инъекцией. Сб. "Вопросы геотехники" № I3, под ред. проф. М.Н. Гольдштейна, Киев, "БудІвельник", 1968.
5. Определение коэффициента фильтрации заполнителя балластного корыта. Сб. "Вопросы геотехники" № I3 под ред. проф. М.Н. Гольдштейна, Киев, "БудІвельник", 1968.
6. Стабилизация земляного полотна омоноличиванием балластных углублений и укладкой подбалластных плит. Сб. "Вопросы геотехники" № I5, под ред. проф. М.Н. Гольдштейна, Транспорт, 1969.
7. Влияние омоноличенной зоны балластного углубления на жесткость земляного полотна. Сб. "Вопросы геотехники" № I5 под ред. проф. М.Н. Гольдштейна, Транспорт, 1969 (совместно с К.М. Панасом).
8. Исследование на моделях деформаций основной площадки земляного полотна и методов ее стабилизации. Сб. "Вопросы геотехники" № I7, под ред. проф. М.Н. Гольдштейна, 1970 (совместно с О.М. Резниковым), (в печати).



Сканировала Семенова Т.Л.