

А. А. ГЕРНОГ

ГОФРИРОВАННЫЕ ТРУБЫ
НА АВТОМОБИЛЬНЫХ ДОРОГАХ

ИЗДАНИЕ ГУПСОЛАРА

МОСКВА



ПРЕДИСЛОВИЕ

Высокие скорости автомобильного движения требуют удобных и безопасных дорог.

Перед проектирующими и строящими организациями в связи с этим возникает ряд задач, требующих разрешения. Одной из таких задач является выбор типа искусственного сооружения малого отверстия, обладающего достаточной долговечностью, целесообразностью конструкции и экономным расходованием материала.

Это заставляет проектировщика более широко использовать для строительства искусственных сооружений на автомобильных дорогах конструкции из железобетона и металла.

Вместе с тем, рост механизации строительства и директивы партии и правительства о максимальной индустриализации строительных пещелок требуют применения соответствующих конструкций.

В выявившейся ситуации вполне своевременно вновь возбуждить вопрос о применении для малых искусственных сооружений труб, называемых гофрированными. Эти трубы наилучшим образом отвечают требованиям механизации и индустриализации строительства и снижения его стоимости.

Гофрированные трубы обладают весьма важными преимуществами по сравнению с трубами из других материалов. Гофрированные трубы значительно легче железобетонных, а тем более каменных при одном и том же диаметре. Процесс сооружения гофрированной трубы занимает мало времени. Сборка трубы очень проста и не требует наличия квалифицированной рабочей силы и особых приспособлений. Отдельные секции трубы благодаря их малому весу и возможности складывания в пачки весьма удобны для транспортирования. Гофрированная труба может быть вынута из насыпи и перенесена в другое место или заменена трубой другого диаметра без особыго труда и без разрытия насыпи.

Кроме того, гофрированные трубы требуют меньшей высоты засыпки, нежели трубы из других материалов, и удобны в случае необходимости уширения дороги, так как труба может быть легко удлинена наращиванием потребного количества секций.

Помимо этого, гофрированные трубы обладают рядом положительных эксплуатационных качеств: малые затраты на ремонт; простота ремонта; сопротивляемость разрушению при размыках дороги; сопротивляемость разрушающему действию льда при замерзании воды в трубах; безопасность в пожарном отношении и сравнимая долговечность конструкции.

Изготовление специального металла „Арко“, применяемого для увеличения срока службы гофрированных труб, нашей промышленностью в настоящее время освоено.

Внедрение в практику автодорожного строительства гофрированных труб является конкретным разрешением задачи о выборе наиболее рациональной конструкциинского сооружения малого отверстия. Кроме того, применение гофрированных труб имеет большое значение для строительства военно-полевых дорог, благодаря указанным выше качествам этих труб.

В связи с этими соображениями инженерно-техническим работникам дорожного строительства полезно познакомиться с данными о давно известных, но забытых сейчас у нас, гофрированных трубах и ввести этот тип искусственных сооружений при постройке автомобильных дорог.

В книге дан исторический обзор применения гофрированных труб, описание конструкций и методы постройки, эксплуатационные характеристики и экспериментальные и расчетные данные. Часть экспериментальных данных получена автором из специально проведенных им опытов.

Автор

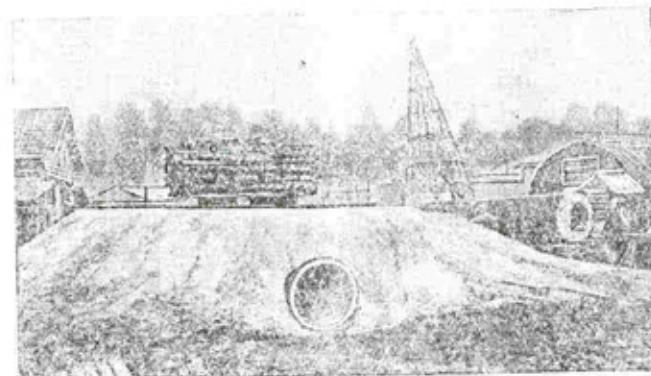
Глава I

КРАТКИЙ ИСТОРИЧЕСКИЙ ОЧЕРК¹

§ 1. Применение гофрированных труб в России

Гофрированные трубы, как конструкция для пропуска воды под насыпями, были известны еще в прошлом столетии.

В России эти трубы появились в 1875 г. и были предложены управляющим Петербургским металлическим заводом инж. Крель управлению Общества Рижско-Вяземской ж. д. для замены старых деревянных труб.



Фиг. 1. Первое испытание гофрированной трубы на Петербургском металлическом заводе в 1875 г.

Несмотря на благоприятные результаты опыта завода (фиг. 1) над конструкцией трубы под нагрузкой. Техническо-инспекционный комитет министерства путей сообщения (МПС) запретил применение этих труб на Рижско-Вяземской ж. д.

В 1887 г. при постройке Закаспийской ж. д., производимой военным министерством, впервые было уложено около 470 пог. м гофрированных труб диаметром в 0,53 и 1,07 м. Это оказалось возможным, благодаря независимости военного ведомства от постановлений МПС, после предварительных (повторных после опыта 1875 г.) опытов на упомянутом выше заводе и укладки опытной трубы на Семипниковой ветке Николаевской ж. д.

¹ По данным книги Фельдт В. Новый тип искусственных сооружений малых отверстий. Варшава, 1914.

На Закаспийской ж. д. на участке Чарджуй — Самарканд в 1888 г. было уложено еще 833 пог. м труб тех диаметров.

В 1896 г. при постройке Самарканд-Андижанской ветки преемнику Техническо-инспекторского комитета — Инженерному совету МПС — вновь пришлось давать заключение о возможности применения гофрированных труб для искусственных сооружений (журнал № 210 от 23/X и 18/XII 1896 г.).

На этот раз Инженерный совет пошел несколько дальше.
Приводим выдержку из постановления Инженерного совета:

... I. Допустить укладку труб из оцинкованного волнистого железа, изготовленных Петербургским металлическим заводом, для пропуска воды в тех случаях, когда такие трубы не будут подвергаться нагрузке от подвижного состава и не будут пропускать воду полным сечением, как, например, при проведении аркоков, когда трубы будут укладываться взамен лотков для дренажа и т. п.

II. Оставить открытым вопрос о применимости труб из волнистого железа для укладки их взамен чугунных под железнодорожными насыпями в тех случаях, когда трубы подвергаются давлению насыпи и проходящего по ней подвижного состава и могут пропускать воду полным сечением и даже работать под напором.

III. Допустить, в виде опыта, упомянутые в ст. I трубы возможно большего диаметра под насыпями высотой от 0,5 до 3 саж. над верхним ребром трубы на ветвях казенных железных дорог, по преимуществу с одним товарным движением, с тем, чтобы за такого рода трубами был установлен особо тщательный надзор...

Это постановление, несмотря на его явный консерватизм, все же сыграло свою положительную роль, так как позволило применить гофрированные трубы в железнодорожном строительстве и по ведомству министерства путей сообщения. Трубы стали изготавливаться к тому времени, кроме Петербургского, и Прушковским заводом близ Варшавы.

За время с 1896 по 1900 г. гофрированные трубы были уложены на железных дорогах: Екатерининской, Николаевской, Владивостокской, Закавказской и на Занеманских ветвях. Кроме того, было уложено свыше 1100 пог. м труб на Мургабской ветви, построенной распоряжением военного ведомства.

В 1901 г. широкое применение получили гофрированные трубы на постройке Оренбург-Ташкентской ж. д. В период между 1901—1904 гг. Петербургскому металлическому заводу было заказано этой дорогой свыше 13 000 пог. м труб диаметром от 64 до 117 см. Разрешение на укладку труб было дано Инженерным советом (журнал № 107, октябрь, ноябрь 1901 г.). На этот раз Инженерный совет определенно высказался за применение гофрированных труб без каких-либо ограничений, базируясь на опыте постройки их на Мургабской ветви.

На всех дорогах, где были построены до этого гофрированные трубы, отзывы об их работе в эксплуатации были положительны. Однако, на Оренбург-Ташкентской ж. д., как это выяснилось из доклада инж. Ясевича 26/III 1913 г. на собрании инженеров путей сообщения (см. „Известия собрания инженеров путей сообщения за 1913 г. № 35 и 36), результаты их применения были неудовлетворительны.

Это объясняется отчасти неправильным производством работ на Оренбург-Ташкентской дороге, а в основном — недостаточностью сечения волнистых

Результаты применения гофрированных труб на Оренбург-Ташкентской дороге, опубликованные накануне империалистической войны, не сколько затормозили их распространение. Наступившие затем империалистическая и гражданская войны окончательно приостановили их производство.

В период между 1901 и 1914 гг. гофрированные трубы применялись в довольно большом количестве.

На железнодорожной сети с 1887 по 1914 г. было уложено около 62 400 пог. м, или приблизительно 5000 труб.

Для труб на шоссейных дорогах гофрированный металл за время с 1887 по 1914 г. применялся в весьма ограниченном количестве, измеряясь десятками погонных метров.

С 1914 г. гофрированные трубы на шоссейных дорогах не применялись.

§ 2. Применение гофрированных труб за границей

Данные о гофрированных трубах и их применении для пропуска вод под насыпями дорог за границей особенно хорошо известны по рекламной литературе нескольких фирм США. Еще в 1893 г. гофрированный металл не находил себе применения в США, как материал для труб, хотя в это время там широко было развито его применение для строительства пакгаузов, сараев и извесов.

В настящее время применение гофрированных труб для пропуска вод под насыпями дорог в США получило широкое распространение. Существуют специальные фирмы, которые занимаются изготовлением гофрированных труб (Appiso Culvert Manufacturers Association, Middletown, Ohio; Gohl Culvert Manufacturers и др.).

Многие железнодорожные линии, как, например, International Great Northern Railroad, заменили большое количество деревянных мостов и чугунных труб гофрированными. Одна фирма за один 1923 г. изготавлила до 10 000 пог. м гофрированных труб для нужд железных дорог. На линии Western Pacific существуют две трубы, из которых одна диаметром $d = 1,524$ м расположена под насыпью в 38 м, а другая $d = 0,91$ м — под насыпью в 0,4 м (от подошвы и над до верха трубы).

Распространение гофрированных труб в США в качестве водопроницаемых сооружений сопровождалось большой исследовательской работой. Эти исследования проводились как в лабораториях (опыты инж. Fowler'a, проф. Иллинайского университета Talbot'a и Marston'a), так и в полевых условиях (работы Американской ассоциации железнодорожных инженеров, опыты университета Северной Каролины). Фирмы, в свою очередь, поставили задачу отыскания наилучшего антикоррозийного металла, хорошо воспринимающего оцинковку. В результате появились металлы Агисо и фирмы Asthe — No — Co — Ro, приближающиеся по своему составу к химически чистому железу, высокие антикоррозийные качества которого хорошо известны (например, Делийская колонна в Индии из чистого железа простояла 1600 лет, цепи моста в Newburgh просуществовали 112 лет).

Глава II

ОПИСАНИЕ КОНСТРУКЦИИ ГОФРИРОВАННЫХ ТРУБ, ИХ ХАРАКТЕРИСТИКА И ДАННЫЕ О МАТЕРИАЛАХ

§ 3. Конструкция гофрированных труб

Находящееся под насыпями дорог водопропускное сооружение из волнистого железа состоит из следующих элементов: а) основания, б) собственно трубы, в) оголовочных устройств.

Конструкция труб в общем довольно проста, но и она за время с 1875 г. (в России) и до наших дней (в США) подверглась некоторому усовершенствованию.

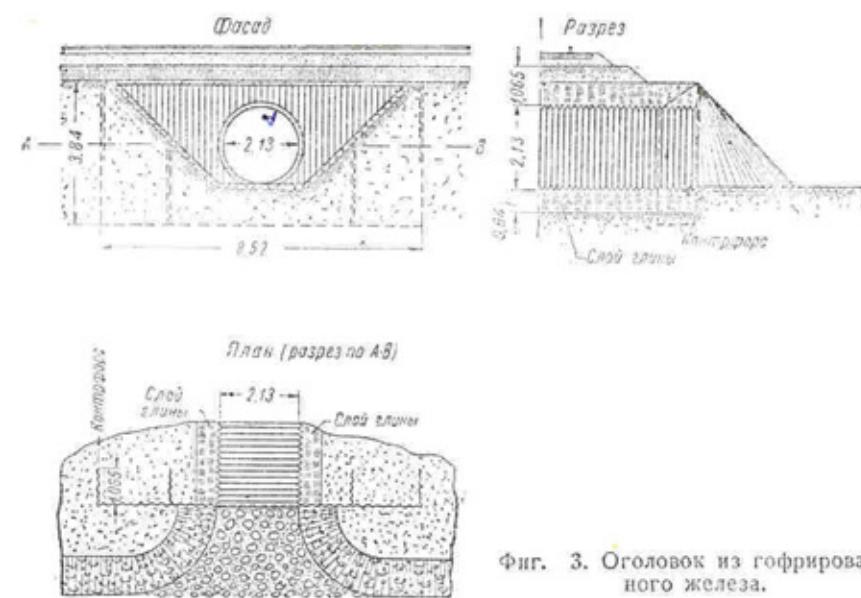
Трубы, существующие на наших дорогах, построенные до 1914 г., хотя и устарели, но представляют некоторый исторический интерес. Поэтому ниже рассмотрено несколько типов конструкций наших и современных американских труб.

А. Трубы, построенные в России¹

Гофрированные трубы укладывались непосредственно на грунт, причем глинистый грунт предварительно подвергался разрыхлению. При наличии скалы поверх ее укладывался утрамбованный слой жирной глины. В случае солончаковых почв, под трубой, на всю ее длину и на двойную ширину при глубине до 0,5—0,6 м, производилась замена грунта на жирную, хорошо утрамбованную глину. Предписывалось также, но не всегда, правда, выполнялось, заменять таким слоем легко размываемые пески. При илистых и торфяных грунтах рекомендовалось предварительно отсыпать земляное полотно для получения равномерной осадки грунта и после откопки уложить под трубу слой жирной глины с тщательной его утрамбовкой.

Конструкция собственно труб состояла, в первый период появления гофрированной конструкции, из склеенных на заводе отдельных звеньев длиной до 2,13 м, соединяемых на месте работ гофрированными же круглыми наружными накладками, которые закреплялись на трубе оцинкованной проволокой. Заводская клепка выполнялась "входящую" заклепкой диаметром до 8 мм. Клепка производилась по шайбам. Заклепки и шайбы делались из мягкого железа и оцинковывались. Промазки сурником швов и отверстий под заклепки на заводе не производилось. Коимцевые звенья для жесткости обделялись окаймляющим уголком. Части труб с уголками жесткости показаны на фиг. 2.

В виду эксплоатационных (слабость шва и его водопроницаемость) и транспортных (громоздкость звеньев труб для перевозки) недостатков впоследствии перешли на клепку труб из отдельных бомбированных (сводчатых) кусков непосредственно на месте, применяя промазку швов и отверстий сурником. Отверстия под заклепки в секциях делались на



Фиг. 3. Оголовок из гофрированного железа.

заводе заблаговременно. Таким образом, в результате получались целиком склеенные трубы без швов сопряжений на накладках с прозолокой. Перевозка изготовленных на заводе секций была весьма удобна в виду возможности складывания их друг на друга для образования пачек.

В нашей стране до 1914 г. трубы изготавливались из отдельных звеньев или секций с соединительными частями между собой в виде заклепок или круговых накладок на проволоке. В последнем случае клепка звеньев была заводская, в первом — исключительно монтажная.

Диаметр труб колебался от 0,43 до 1,20 м, хотя было выстроено несколько труб диаметром и свыше 1,20 м.

Собранный труба обычно задельвалась в глиняное ядро толщиной 0,3—0,4 м. Примесей гравия или песка к глинистой оболочке не делали, чтобы не создавалось частичной фильтрации воды.

Оголовочные устройства для труб устраивались в виде:

- каменных оголовков на растворе или из сухой кладки,
- оголовков из гофрированного железа (фиг. 3) и
- мощных камнем откосов.

Фиг. 2. Части гофрированных труб, изготовленные на заводе.

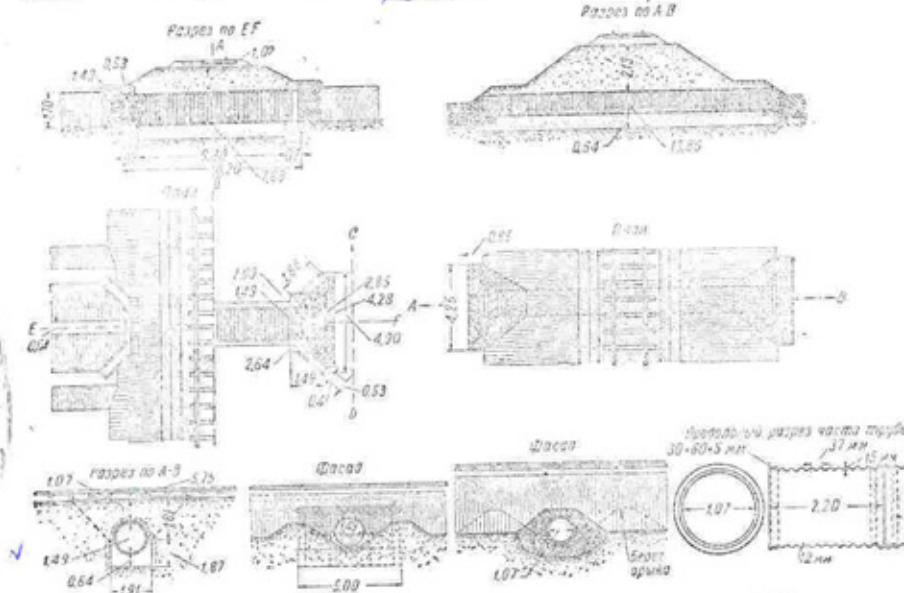
¹ По данным книги Фельдт В. Новый тип искусственных сооружений малых отверстий. Варшава, 1914.

Для некоторых труб, находящихся в благоприятных с точки зрения протекания воды условиях, оголовочных устройств не делалось.

Опыт показал неизбежность большинства построенных оголовков, которые обычно возникали в случае наличия плохих грунтов и при достаточно большом расходе воды. Эти оголовки значительно увеличивали стоимость труб.

В нашей стране до 1914 г. не разрешалось строить гофрированных труб для пропуска воды с напором, хотя конструкция труб с монтажной клепкой на суринке была вполне надежная для такой работы.

На фиг. 4 приводится конструкция двух гофрированных труб. Справа показана конструкция трубы $d = 1,97$ м смещением входного и выход-

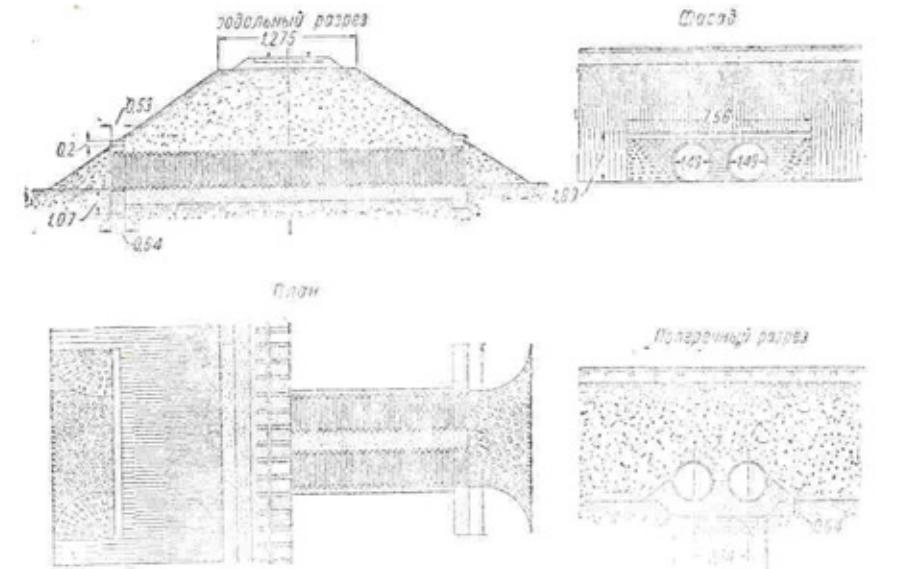


Фиг. 4. Конструкция гофрированных труб периода 1887—1888 гг.

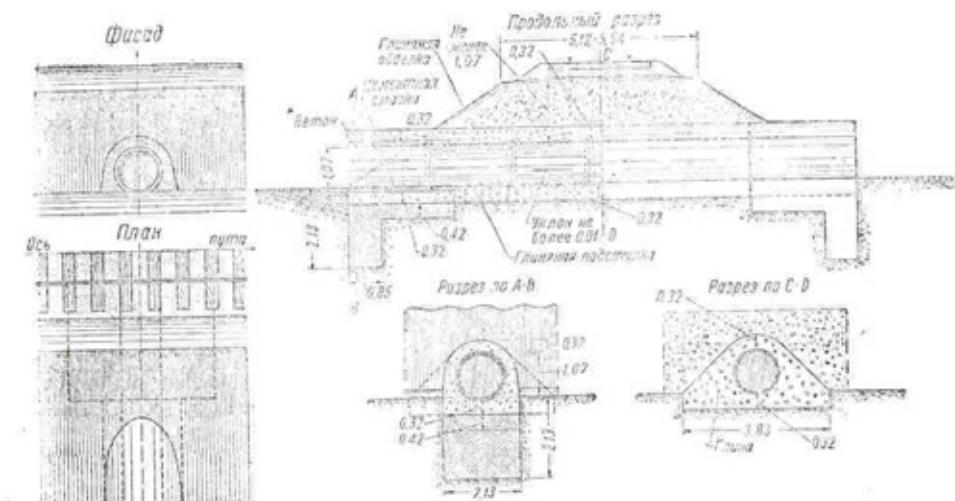
ного отверстий булыжником. Труба на место работ доставлялась отдельными звеньями, соединяемыми бомбированными накладками на проволоке. Труба укладывалась на слое песка. Железо применялось толщиной в 1,2 мм при длине волны в 37 мм и высоте — 15 мм. Постройка относится к 1887/88 г.

Слева на фиг. 4 показана более поздняя конструкция трубы без монтажных стыков с накладками. Оголовки — каменные, основание — песчаное. Размер железа: толщина $\delta = 1$ м.м., длина волны — 68 м.м., высота — 34 м.м. Труба была построена для пропуска аркы. Устройство оголовков, как показала эксплоатация трубы, оказалось излишним. Постройка трубы относится к 1894—1898 гг.

Гофрированные трубы могут быть устроены и многощековыми. Пример двухщековой трубы приведен на фиг. 5. Труба цельноклепанная на месте с промазкой швов сурником; запроектирована на работу без подпора. Основание — песчаное; оголовки — каменные на цементном растворе.



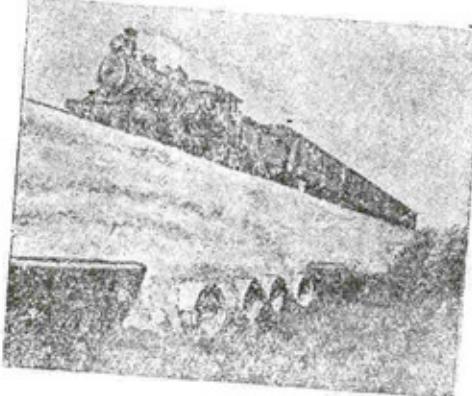
Фиг. 5. Продольная труба постройки 1976 г. № 7



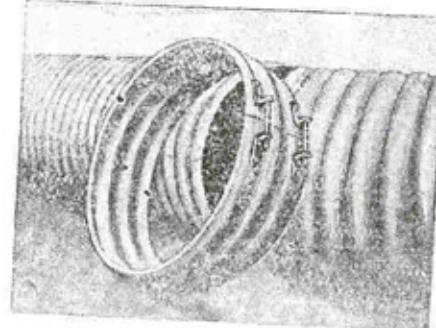
Фиг. 6. Конструкция трубы постройки 1912 г.

Конусы и дно выходного и входного отверстий замощены камнем на му-
Железо толщиной 1,5 мм. Клепка внахлестку с заклепками, расставлен-
ными вдоль и поперек воли в шахматном порядке в два ряда. Диаметр
заклепок — 6 мм. Как и в предыдущей конструкции (фиг. 4), наличие
оголовков в последующем не оправдалось. Труба была построена
в 1906—1907 гг.

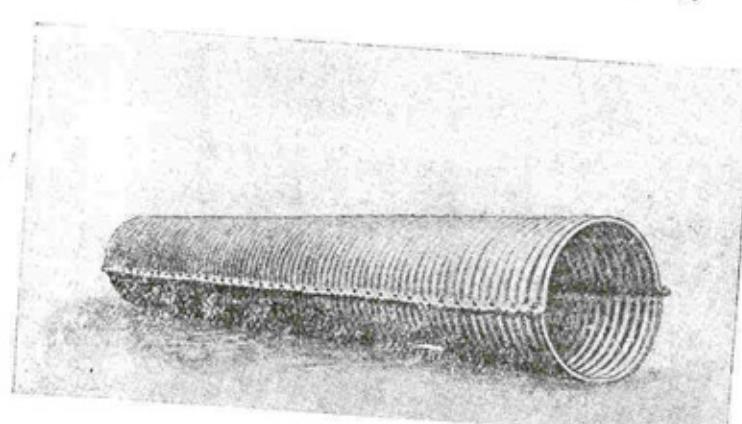
Наиболее поздний тип гофрированной трубы в нашей стране относится к 1912 г. (фиг. 6) и обращает на себя внимание громоздкостью оголовков. Труба заключена в глиняное ядро, а оголовки — в бетонное кольцо. Толщина железа (без оцинковки) — 1 мм при размерах волн 68×34 мм. Трубы — звеньевые, с соединением стыков (через 2,13 м) гофрированными накладками, стягиваемыми оцинкованной проволокой диаметром 4 мм.



Фиг. 7. Четырехзажимовая труба без оголовков на одной из железных дорог США.



Фиг. 8. Накладки со стяжными болтами, применявшиеся в США в первый период распространения гофрированных труб.



Фиг. 9. Труба фирмы Аспе на болтах.

Концевые звенья усилены уголком жесткости. Диаметр трубы — 1,07 м. Оголовки излишне массивны, так как труба работает без напора. В этой конструкции можно видеть как бы шаг назад по сравнению с типом труб 1887—1894 гг. (наличие громоздких оголовков, не оправданных практикой; наличие стыков звеньев, выполненных при помощи гофрированных накладок и скрепляющей проволоки).

Трубы построенные в США

В отношении основания и оголовочных устройств в США наблюдается, примерно, такая картина, как и у нас.

США часто применяют трубы без оголовков (фиг. 7), каменные же оголовки из цементного раствора встречаются редко.

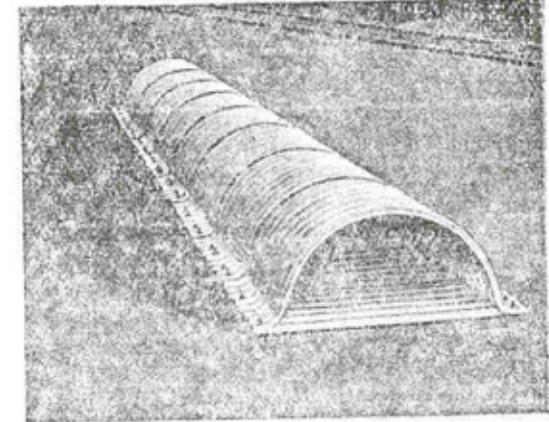
Первоначально конструкция труб в США также имела соединительными деталями заклепки. Причем трубы изготавливались диаметром от 0,2 до 1,85 м отдельными звеньями, которые, как и у нас, на месте работ соединялись специальными бомбированными накладками, имеющими для натяжения вместо проволоки стяжные болты (фиг. 8).

Другая фирма (Аспе) для соединения частей трубы применяла болты (фиг. 9), предложив, кроме того, трубы с прямолинейным гофрированным основанием (фиг. 10).

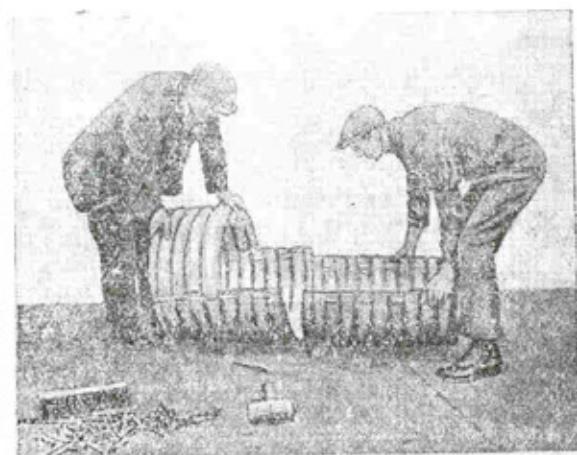
В последнее время в США для удобства транспортирования частей трубы приняты конструкции из отдельных секций (фиг. 11), соединяемых на месте работ с помощью различных скреплений (фиг. 12). Диаметры наиболее употребительных в США труб с некоторыми другими данными приведены в табл. 1.

Таблица I

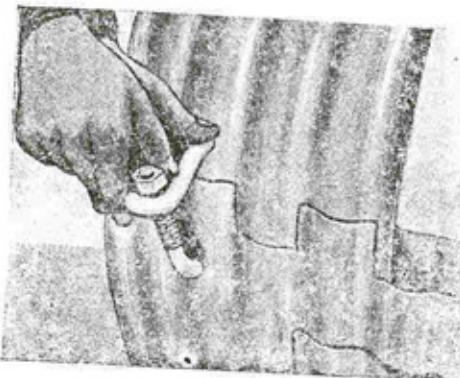
Диаметр труб в м	0,30	0,38	0,46	0,53	0,61	0,76	0,92	1,07	1,22	1,52	1,83	2,13
№ по сортаменту (калибр)	16	16	16	16	16	14	14	14	12	12	10	10
Толщина железа в мм	1,6	1,6	1,6	1,6	1,6	2,0	2,0	2,0	2,8	2,8	3,6	3,6
Вес пог. м трубы в кг	15,9	19,5	22,6	25,7	29,0	43,1	51,9	59,0	93,6	116,0	175,5	202,0



Фиг. 10. Труба с прямолинейным гофрированным основанием.



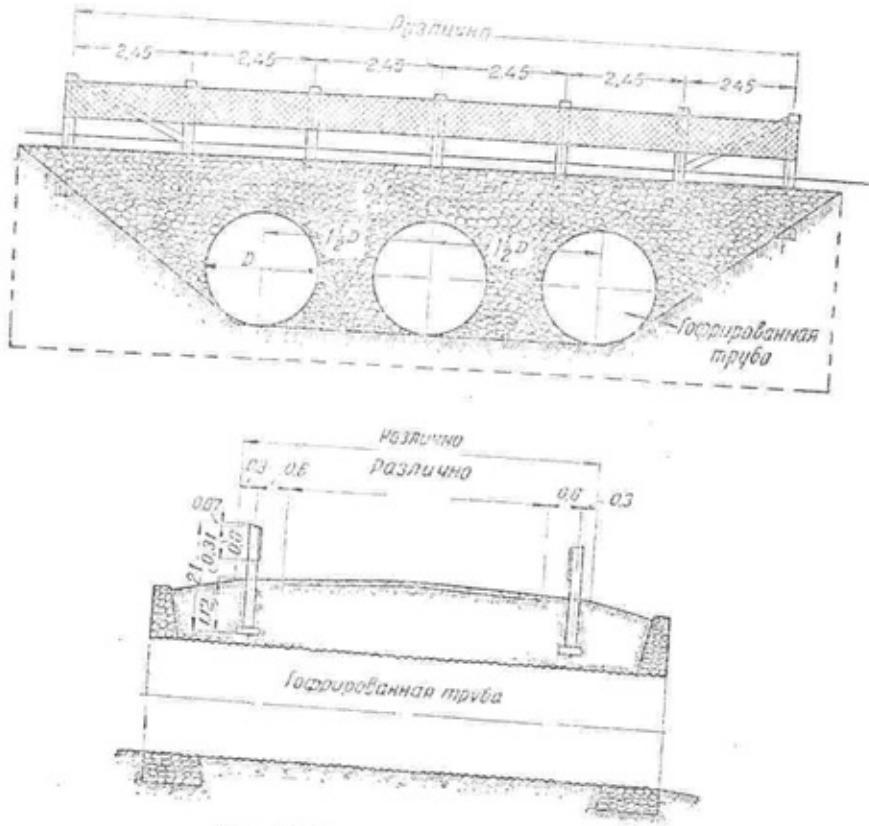
Фиг. 11. Отдельные секции гофрированной трубы.



Фиг. 12. Одна из типов скрепляющей детали в гофрированных трубах.

ицами ему вид каменного перехода. Сооружение такого типа имеет

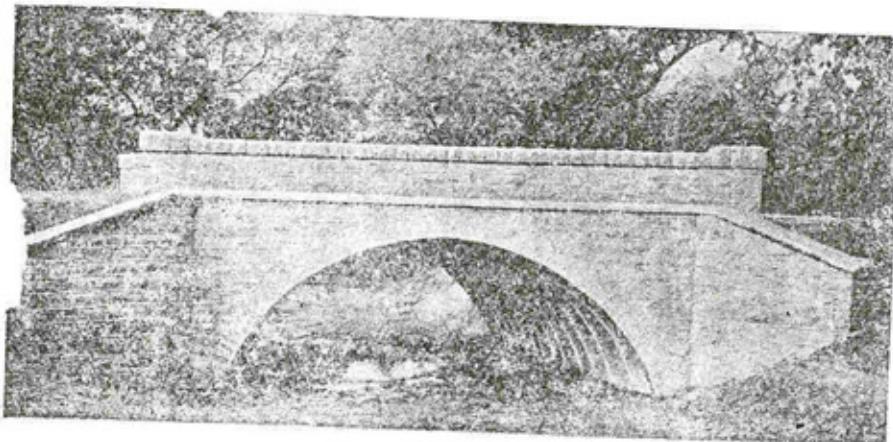
широкое применение на высокую эстакадную склону.



Фиг. 13. Трехочковая труба-мост.

В США часто встречаются многоочковые трубы, заменяющие собой небольшие мостики. Пример такого сооружения приводится на фиг. 13. В этой конструкции обращают на себя внимание легкость оголовков (сухая кладка), отсутствие фундаментов и простота сооружения в целом при довольно значительном суммарном отверстии в свету.

На фиг. 14 показан общий вид небольшого моста, построенного из гофрированного металла, с оголовками, придающими ему вид каменного перехода. Сооружение такого типа имеет



Фиг. 14. Общий вид небольшого моста из гофрированного железа.

§ 4. Характеристика гофрированных труб

Рассмотрим свойства гофрированных труб со строительной и эксплуатационной точек зрения по данным железных дорог, так как данные по безрельсовым дорогам отсутствуют. Полученные выводы можно применить и к автомобильным дорогам.

A. Строительная характеристика

Дешевизна конструкции. Отсутствие в настоящее время данных о стоимости гофрированных труб заставляет обратиться к цифрам прошлого. Эти цифры могут с достаточной точностью и для наших условий дать представление о соотношении стоимости между гофрированными трубами и конструкциями, их заменяющими.

Как пример, можно привести следующие данные строительной стоимости, полученные с Закавказской ж. д. за 1914 г.

Стоимость 1 пог. м гофрированной трубы $d=0,7 \text{ м}$ составила 26 руб., а трубы $d=1,07 \text{ м}$ — 39 руб. Бетонные же трубы в тех же условиях стоили: для $d=0,64 \text{ м}$ — 43 р. 70 к., а для $d=0,75 \text{ м}$ — 52 р. 40 к. По этим данным гофрированные трубы почти в два раза дешевле бетонных.

Интересно также привести данные Оренбург-Ташкентской ж. д., полученные при составлении смет на замену деформированных гофрированных труб. Эта смета составлена в начале 1914 г.

По этой смете получаются следующие стоимости:

- а) при замене гофрированной трубы такой же новой 500 руб.
- б) при вставке в старую трубу такой же новой 500—1300 руб.
- в) при отводе воды в сторону 800—2400 руб.
- г) при замене трубы каменным мостом 3000—6000 руб.

¹ По данным книги Фельдт В. Новый тип искусственных сооружений малых отверстий. Варшава, 1914.

Взяв среднюю цену ремонта трубы гофрированной вставкой в 900 руб., а среднюю стоимость каменного моста в 4500 руб., получим, что восстановление трубы в 5 раз дешевле замены ее каменным мостом.

Сравним между собой стоимость каменной и гофрированной труб отверстием в 2 м при той же высоте насыпи, с глубиной заложения основания в 1,5 м и при длине трубы около 12,5 м.

Каменная труба требует около 150 м³ кладки по цене за 1 м³ около 30 руб. (цены 1914 г.) и будет стоить около 4500 руб. С земляными работами и устройством мостовой на мху вся стоимость трубы составит около 4800 руб.

Гофрированная труба потребует около 1,6 м железа по цене 360 руб. за 1 м (по ценам 1914 г.), что составит около 570 руб. Полная стоимость гофрированной трубы вместе с устройством лотка, замощением и земляными работами составит около 920 руб., или в 5 раз меньше каменной трубы.

По расходу рабочей силы гофрированные трубы значительно экономичнее каменных и бетонных. Для монтажа труб не нужно рабочих, высокой квалификации и в случае применения специальных скреплений, не требующих клепальных работ.

Приведенная выше стоимость металла в 360 руб. за 1 м является для 1914 г. довольно высокой. Это, по всей вероятности, объясняется монополией изготовления этих труб всего двумя заводами. Если сравнить стоимость русского и американского гофрированного металла в то время, то получим следующую картину.

Стоимость тонны металла франко-Петербургский металлический завод для трубы $d = 1,07$ м при профиле железа $68 \times 34 \times 1$ мм возрастает в следующем порядке:

а) черное листовое железо	150	руб.
б) оцинкованное листовое железо	220	*
в) гофрированное оцинкованное железо	250	*
г) бомбированное гофрированное оцинкованное железо	265	*
д) склепанная гофрированная труба	360	*

Данные о стоимости американских труб Астче франко-Либава за погонный метр в 1914 г. приведены в табл. 2.

Таблица 2

d в м	Руб.	d в м	Руб.	d в м	Руб.	d в м	Руб.
0,20	3,70	0,38	5,90	0,61	9,90	1,22	28,00
0,25	4,30	0,41	6,20	0,76	14,20	1,52	37,40
0,30	5,00	0,46	6,80	0,92	17,90	1,83	55,00
0,36	5,60			1,07	22,20		

По данным табл. 1 и 2 стоимость 1 м гофрированной трубы из железа „Астче“ $d = 1,07$ м составляет около 375 руб., т. е. только на 5% дороже конструкции Петербургского металлического завода, несмотря на дальность возки.

Быстрота производства работ. Собрать и уложить трубу — работа нескольких часов.

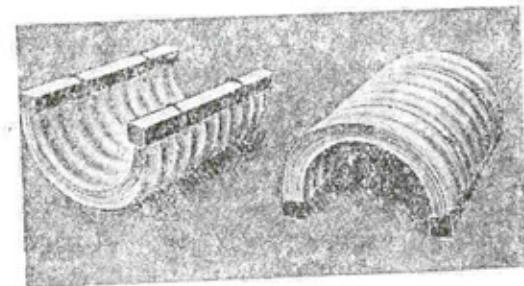
Более длительную операцию составляют утрамбовка земляной массы вокруг трубы и устройство оголовков, если последние делаются. Весь процесс сооружения трубы, в том числе и земляные работы, занимает несколько дней.

Простота сборки. Как будет видно из дальнейшего, сборка гофрированных труб новейшего типа очень проста и не требует квалифицированной рабочей силы и особых приспособлений.

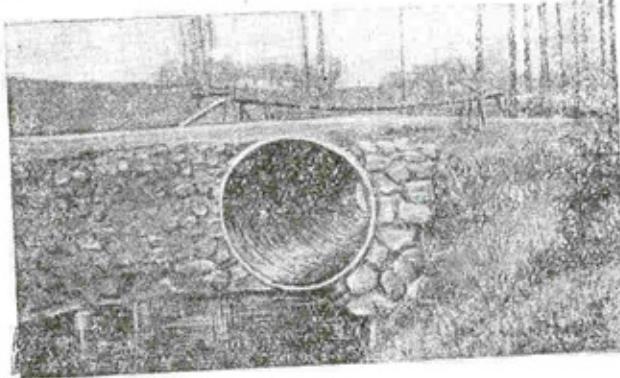
Удобство транспортирования. В условиях дорожного строительства удобство перевозки материала имеет большое значение. Благодаря легкости секций трубы и возможности складывания их в пачки (фиг. 15) гофрированные трубы весьма удобны для транспортирования.

Отсутствие фундамента. Благодаря своей эластичности гофрированные трубы не требуют фундаментов, как трубы из камня, бетона и железобетона. В связи с этим особенно выгодно устройство гофрированных труб в условиях слабых грунтов.

Возможность легкой замены. Перенос готовой и находящейся в насыпи гофрированной трубы или замена ее, в случае необходимости, трубой большего диаметра производится без особых затруднений. При этом труба, вынутая из одного места, целиком используется в другом. О подобных работах не может быть и речи при наличии каменных и железобетонных труб.



Фиг. 15. Упакованные для перевозки секции гофрированных труб в виде пачек.



Фиг. 16. Гофрированная труба при высоте насыпи над оголовком в 21 см.

При применении домкратной установки гофрированную трубу можно задвинуть в уже насыпанную насыпь без ее разрыва.

Малая высота засыпки над трубой. Благодаря указанной эластичности и способности упруго воспринимать деформации полотна под нагрузкой высоту насыпи над верхом трубы можно принимать минимальной.

На постройке Коканд-Наманганской ж. д. в Средней Азии для про- пуска арыков применялись гофрированные трубы с высотой засыпки над

трубой до 0,5 м. В США на железных рогах высота засыпки также приближается к указанной величине и даже делается несколько меньше.

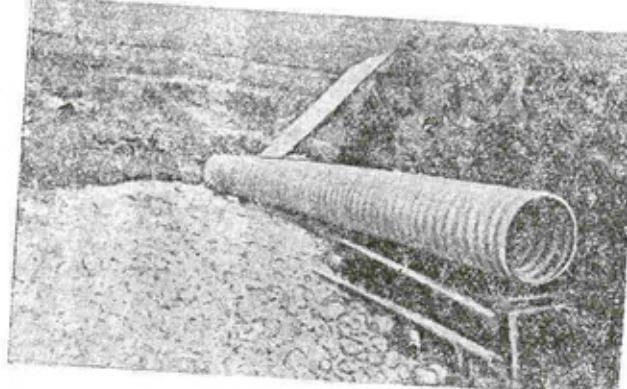
В еще большей мере сказанное относится к трубам на безрельсовых дорогах (фиг. 16).

Возможность удобного уширения дороги. В случае необходимости уширения дороги труба может быть удлинена потребным количеством секций. Работа эта выполняется быстро и без затруднений в отличие от аналогичной работы при наличии каменной или бетонной трубы.

Не останавливаясь на других более мелких преимуществах гофрированных труб со строительной точки зрения, отметим, что основными недостатками их при производстве работ являются возможность повреждения секций при перевозке в случае недостаточно аккуратного обращения и необходимость тщательной утрамбовки насыпи по трубе равномерными рядами, что несколько задерживает производство земляных работ.

Б. Эксплоатационная характеристика

Малые затраты на ремонт. Практика эксплоатации гофрированных труб у нас и в США указывает, что на текущие ремонтные работы затрачиваются незначительные суммы. Так, например, расход на ремонт гофрированных труб, построенных на Ковель-Владимир-Волынской ж. д.



Фиг. 17. Гофрированная труба после размыва дороги.

в 1908 г. в количестве 13 шт. общей стоимостью 14 350 руб., за 4 года в сумме 181 руб., или 1,25% строительной стоимости. Эта сумма израсходована главным образом на ремонт оголовков.

Простота ремонта. При необходимости замены отдельных секций или частей работа производится изнутри трубы, без необходимости перерыва движения и устройства объезда, для чего диаметры труб должны допускать возможность такой работы.

В случае ремонта всей трубы работы также производятся без разрытия насыпи. Новую трубу собирают в старой или, используя домкраты, задвигают новую собранную трубу несколько большего диаметра, объемлющую старую конструкцию, которую затем разбирают и удаляют.

Сопротивление разрушению при размывах дороги. При наводнениях и размывах дорог гофрированные трубы вымываются и сносятся в сторону, но сами по себе остаются целыми (фиг. 17). Это имеет особенно большое значение для автомобильных дорог в горных местностях.

Сопротивляемость действию льда. При замерзании воды гофрированные трубы благодаря своей эластичности не повреждаются, тогда как каменные или бетонные трубы ломаются (фиг. 18).

Однообразие пути и безопасность в пожарном отношении. Как и все трубы, гофрированная конструкция безопасна в пожарном отношении и создает однообразие пути, чего нельзя сказать, например, про деревянные мостики ("ступеньки" в сопряжениях с дорогой, подверженность возгоранию).

Сравнительная долговечность. При наличии правильного производства монтажных работ, достаточности сечений трубы и хорошего, с точки зрения антикоррозийных свойств, качества железа и оцинковки срок службы гофрированной конструкции, по данным нашей и американской практики, может быть принят не менее 30 лет. Если взять сроки службы массивных конструкций до 100 лет, а железобетонных до 50—60 лет, то при существующих соотношениях строительных стоимостей гофрированные трубы являются все же наиболее экономичными конструкциями.

§ 5. Материалы, применяемые для гофрированных труб

Для гофрированных труб в нашей стране применялось листовое железо лучших сортов, при этом на химический состав железа никакого внимания не обращалось.

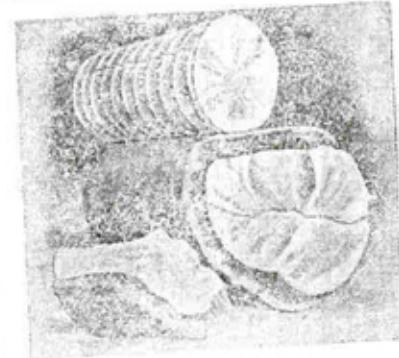
По данным испытаний механической лаборатории Петербургского металлического завода, проделанных в начале 1914 г., были получены средние результаты (из 6 опытов) прочности на разрыв, приведенные в табл. 3 (стр. 18).

Увеличение временного сопротивления разрыву R по мере обработки железа и резкое уменьшение относительного удлинения δ оцинкованного железа может быть объяснено поверхностным натяжением цинковой пленки.

Материал другого завода, изготавлившего гофрированные трубы (Прушковский завод близ Варшавы), также подвергся в том же 1914 г. испытанию прочности на разрыв. Данные этого испытания сведены в табл. 4 (стр. 18).

Материал Прушковского завода оказался прочнее Петербургского. Временное сопротивление разрыву R для оцинкованного железа и на этом заводе получилось несколько выше, чем для неоцинкованного.

В США для гофрированных труб применяется железо Аписо и Но — Со — Ро. Оба эти металла по своему составу приближаются к хи-



Фиг. 18. Действие замерзания воды в бетонной и гофрированной трубах.

Таблица 3

Материал испытываемого образца	Среднее из 6 опытов временное сопротивление разрыву R в $\text{кг}/\text{м}^2$	Удлинение l в % (среднее из опытов в каждой группе)	Примечание	
			Относительное удлинение l в %	Примечание
Черное листовое железо $\delta=1,1 \text{ мм}$	30,7	23		
Оцинкованное железо $\delta=1,5 \text{ мм}$	31,7	12,3		
Оцинкованное гофрированное железо $\delta=1,4 \text{ мм}$	32,1	—	Половина образцов в каждой партии вырезалась вдоль листа, другая полога — поперек листа	
Оцинкованное гофрированное и бомбированное железо $\delta=1,3 \text{ мм}$	32,5	—		

Таблица 4

Материал испытываемого образца	Среднее временное сопротивление разрыву R в $\text{кг}/\text{м}^2$	Относительное удлинение l в %	Примечание	
			Средние величины R определялись для образцов вдоль прокатки из 8 опытов, а для образцов поперек прокатки — из 4 опытов	
Черное листовое железо $\delta=1 \text{ мм}$: вдоль прокатки . . .	37,5	18,6 (по 4 опытам)		
поперек прокатки . . .	32,0	16 (по 1 опыту)		
среднее из 12 опытов	35,8	—		
Оцинкованное железо: вдоль прокатки . . .	38,0	17,8 (по 1 опыту)		
поперек прокатки . . .	34,9	20 (по 1 опыту)		
среднее из 12 опытов	37,0	—		

нически чистому железу, хорошо воспринимают оцинковку и весьма антикоррозийны.

Наибольшую известность в качестве материала для изготовления гофрированных труб в настоящее время получило железо Атиско.

При небольшой толщине металла, применяемого для гофрированных труб, понятно стремление иметь материал достаточной прочности и обладающий высокими антикоррозийными качествами. Одним из таких материалов и является железо Атиско фирмы California Corrugated Culvert Co (США). Производство этого железа в последнее время освоено и у нас.

Для беспристрастной оценки этого широко рекламируемого фирмой материала автором была предпринята проверка различных свойств металла опытным путем.

Для этой цели было использовано железо Атиско, взятое из партии секций труб, выпущенных НКПС из США, с целью применения их на строительстве Турксиба.

Анализы были произведены в Институте материалов НКПС.

а) Химический анализ

Результаты анализа представлены в табл. 5.

Таблица 5

Материалы	Процентное содержание						
	Fe	C	Mn	S	Ph	Si	Cu
Железо Атиско (данные автора)	Не опред.	0,02	Следы	0,02	0,0002	неизвестно	0,007
Железо Атиско (данные фирмы)	99,84	0,01	0,02	0,03	0,006	Следы	—
Чистое железо	—	0,03	0,12	0,33	0,010	Следы	—
Сталь	—	0,10	0,35	0,04	0,02	Следы	—

Цифры табл. 5 показывают довольно близкое совпадение опытных данных с фирменными. Железо Атиско имеет значительно меньше примесей, чем чистое железо, не говоря уже о стали.

б) Механический анализ

Испытание на разрыв производено над 4 образцами (табл. 6) на прессе Амслера. Образцы были взяты из 4 различных секций с вырезом в плоскости, перпендикулярной к оси трубы.

Таблица 6

№ образцов	Размеры образцов			Разрывющее усилие P в кг	Временное сопротивление разрыву R в $\text{кг}/\text{м}^2$	Относительное удлинение l в %	Относительное сужение ϕ в %
	ширина a в мм	толщина δ в мм	площадь сечения $a\delta$ в мм^2				
1	20,08	2,24	45,0	1590	35,3	8,4	51,7
2	20,45	2,25	46,0	1700	37,15	10,1	61,0
3	20,17	2,27	45,8	1430	32,3	11,0	72,4
4	20,21	2,25	45,5	1660	36,2	9,6	58,3
Средние величины из 4 опытов . . .				35,2	9,8	10,9	

Механическая прочность железа Атиско приближается к прочности сварочного железа ($R = 33—40 \text{ кг}/\text{м}^2$; $l = 10—12\%$) и занимает сред-

нее положение между прочностью металла, из ставившегося Петербургским и Прусковским заводами.

Характерным для данного металла является малое относительное удлинение при значительной величине поперечного сжатия.

в) Исследование антикоррозийных свойств

Опыт определения антикоррозийных свойств был поставлен следующим образом. Две пластинки металла Armco со снятым действием соляной кислоты оцинковкой были тщательно промыты водой и обтерты фильтровальной бумагой. Затем они были высушены над хлористым кальцием и помещены вместе с двумя контрольными пластинками из листового железа в насыщенное при $t = 23 - 25^{\circ}\text{C}$ влагой пространство. Здесь образцы пролежали 32 дня. Через каждые 5 дней, а в последний раз через 7 дней, образцы подвергались взвешиванию, предварительно пройдя в течение 4 часов сушку над хлористым кальцием. После последнего взвешивания образовавшийся на образцах слой ржавчины с помощью тонкой пилки был снят, и затем была определена потеря в весе каждого образца вследствие коррозии.

Полученные результаты сведены в табл. 7.

Таблица 7

Образцы	Первоначальный вес в г	Поверхность в см ²	Увеличение в весе в г, отнесенное к 1 дм ² поверхности через							Уменьшение в весе после снятия слоя ржавчины на 1 дм ² поверхности в г
			5 дней	10 дней	15 дней	20 дней	25 дней	32 дня		
Armco № 1.	39,1108	44	0,2972	0,6239	0,9987	1,3345	1,7126	2,2306	4,0875	
Armco № 2.	42,3236	48	0,3012	0,6035	0,9734	1,3485	1,7386	2,0372	3,7306	
Литое железо № 1	24,0952	40	0,2871	0,6072	0,9652	1,2462	1,7534	2,3856	3,9872	
Литое железо № 2	24,2368	40	0,2996	0,6138	0,9531	1,3348	1,7325	2,2458	3,8136	

Все пластиинки после 32-дневного опыта сплошь были покрыты ржавчиной, расположенной в виде точек почти по всей поверхности образцов и наиболее густо на их ребрах.

По данным проделанного опыта, коррозионное действие как на железо Armco, так и на контрольные образцыказалось примерно одинаково, что противоречит установленвшемуся мнению о лучшей сопротивляемости коррозии железа Armco по сравнению с обычным литым железом.

Поскольку данные опыта получены в лабораторной обстановке, довольно удаленной от действительных условий работ, и к тому же над небольшими образцами, что могло привести к случайным результатам, то ниже приводятся данные об антикоррозийности американских металлов, имеющиеся в литературе.

Установлено, что железо с минимальным количеством примесей наиболее устойчиво против коррозии. Это объясняется невозможностью или

затруднен. гью протекания в чистом металле электролитических процессов, следствием которых является образование гидрата окиси железа („ржавчины“). Особенное значение здесь имеет почти полное отсутствие марганца, играющего весьма активную роль в указанном электролитическом процессе.

Цинк является положительным элементом по отношению к железу. Поэтому покрытые цинком железо или сталь оказываются в электролитическом отношении отрицательными или химически недействительными. Этим и объясняется применение цинка как защитного покрова железа от коррозии. Понятно, конечно, что оцинкованное чистое железо более антикоррозийно, чем оцинкованная сталь, благодаря более чистой структуре, при которой сохраняется постоянство взаимодействия между цинком и защищаемым им металлом.

Основываясь на этих положениях, американские фирмы предложили применять металлы Armco и №—Со—Ро, имеющие минимальное количество примесей и чистую структуру.

Для суждения об антикоррозийности №—Со—Ро был поставлен такой опыт: две пластиинки толщиной по 1,5 мм, одна из испытуемого металла, а другая из стали, в течение 10 часов подверглись действию 20%^o-ного раствора соли гидрохлорита при нормальной температуре. На окончании опыта стальная пластиинка потеряла в весе 10%, а пластиинка №—Со—Ро только 2%.

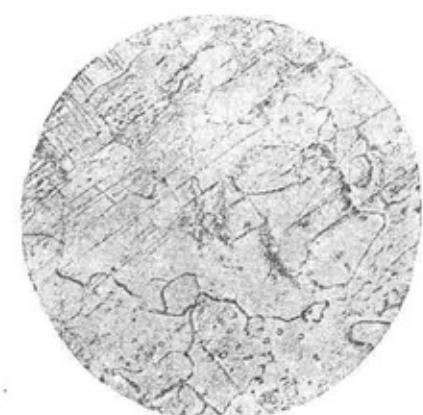
Эксплуатационные данные также указывают на хорошее сопротивление американских гофрированных труб коррозии.

г) Исследование микроструктуры

Последним из проделанных исследований было определение структурных свойств металла. Из той же партии металла, выписанной НКПС для Турксиба, на одном кусочке, вырубленном в одной из секций, были засняты 2 снимка соответственно по сечениям образующей (фиг. 19, увеличение 100:1) и перпендикулярно к оси трубы (фиг. 20, увеличение 250:1).



Фиг. 19. Микроструктура опытного образца железа Armco. Сечение по-перек гофрировки.

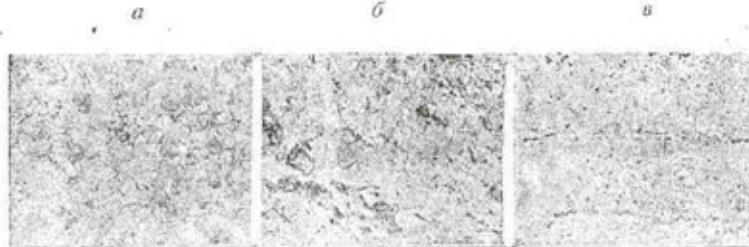


Фиг. 20. Микроструктура опытного образца железа Armco. Сечение вдоль гофрировки.

Для сравнения приводим фотографии микроструктуры железа Агисо по данным фирмы (фиг. 21, а), кричного железа (фиг. 21, б) и стали (фиг. 21, в) при увеличении в 70 раз.

Сопоставляя снимок микроструктуры по данным фирмы (фиг. 21, а) и два наших снимка (фиг. 19 и 20), замечаем, что два последних имеют большую засоренность вкраплениями, чем первый. Очевидно, присланные Турксибу трубы не были сделаны в технологическом отношении, с точки зрения плотности структуры, так доброкачественно, как образец фирмы.

Структура железа Агисо как вдоль, так и поперек прокатки примерно одинакова. Во всех трех снимках (фиг. 19, 20 и 21, а) ясно видно зер-



Фиг. 21. Микроструктура железа Агисо, кричного железа и марганцевой стали.

нистое строение металла. Кричное железо (фиг. 21, б) имеет такие же зерна феррита, но с гораздо большим количеством примесей и шлаков. Что касается стали (фиг. 21, в), то здесь совершенно отсутствуют зерна феррита, что объясняется большим количеством примесей и особенно марганца, засоряющих структуру металла.

Эти снимки подтверждают справедливость данных о железе Агисо, как достаточно однородном и почти свободном от вредных, с антикоррозийной точки зрения, примесей.

Глава III

ПОСТРОЙКА ГОФРИРОВАННЫХ ТРУБ

Правильное производство работ при укладке труб, как указывалось, имеет большое значение для последующей эксплуатационной их службы. С этой точки зрения весьма ценно подвести итоги постройки гофрированных труб у нас и в США.

§ 6. Постройка гофрированных труб в России¹

Сооружение трубы из гофрированного железа под насыпью дороги распадается на два процесса: заводское изготовление элементов труб и их скреплений и производство работ на месте.

¹ По данным книги Фельдт В. Новый тип искусственных сооружений малых отверстий. Варшава, 1914.

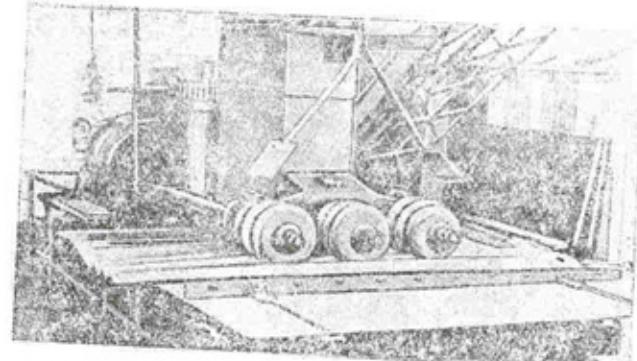
A. Заводское изготовление элементов труб

Весь заводской процесс изготовления труб из гофрированного железа разбивается на следующие этапы:

- а) заготовка листового железа,
- б) оцинковка,
- в) гофрирование,
- г) бомбирование и
- д) склепка в звенья.

Заготовка листового железа обычно производилась из материала лучшего качества, но при этом, как указывалось, совершенно не считались с химическим его составом.

Оцинковка на наших заводах производилась горячим способом. Перед оцинковкой листовое железо промывали и очищали в ваннах с горячими



Фиг. 22. Вальцовочный станок для гофрирования листового железа.

кислотами для получения плотного прилегания цинка к поверхности покрываемого металла. Так как оцинковка лучше всего достигается на ровных поверхностях, то железо оцинковывалось до гофрирования. Сама оцинковка производилась в ваннах с расплавленным цинком.

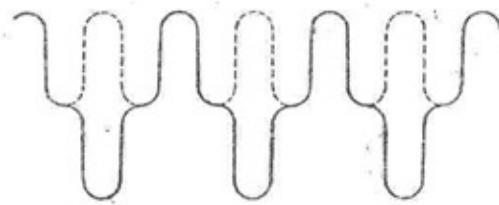
Приемка оцинкованных листов производилась по специальным техническим условиям, в которых особо отмечалась необходимость плотного и равномерного приставания слоя цинка к поверхностям железа тонкой пленкой, без пузырьков. Из каждой партии не менее двух листов подвергалось испытанию на загиб до 0° и разгиб до 180° в холодном состоянии, с помощью деревянного молотка. При этом железо не должно было ломаться, а слой цинка не должен был отскакивать, особенно в месте загиба.

Гофрирование на Петербургском металлическом заводе производилось в два приема. Сначала оцинкованное листовое железо принимало первоначальное гофрирование на специальном прессе, а затем поступало в правильный станок с вальцами для окончательной отделки — выпрямки.

На Пружковском заводе гофрирование производилось сразу на специальном вальцовочном станке (фиг. 22).

В зависимости от размеров вальцов на заводе получалось два разных типа гофрированного металла — плоское волнистое железо при $h \leq \frac{b}{2}$ и балочное волнистое железо при $h \geq \frac{b}{2}$.

Кроме того, в последние годы перед империалистической войной Петербургский металлический завод организовал у себя изготовление так называемого двухволнистого железа, или железа системы Кнутсона (фиг. 23). Основным отличием профиля двухволнистого железа от обычного гофрированного металла является обращение каждой второй волны вниз.



Фиг. 23. Двухволнистое железо Кнутсона.

Момент сопротивления его на 64% выше таинового в обычном гофрированном металле. В табл. 8 приведены данные основных профилей волнистого сводчатого железа, производимого Прушковским заводом.

Таблица 8

№ профильей	Размеры волны в мм		Вес 1 м ² в кг	Поперечное сечение волны в см ²	Момент инерции волны в см ⁴	Момент сопротивления волны в см ³	Наибольшее число волн	Строительная ширина в мм	Масса 1 м ² волнистого железа, кг
	длина b	высота h							
Плоское волнистое железо (толщина δ = 1 мм)									
✓1	60	20	9,83	0,76	0,3920	0,392	12	720	0,9
3	85	25	9,52	1,04	0,8344	0,667	8	680	
11	150	35	8,87	1,70	2,7072	1,547	5	750	
15	150	60	10,91	2,10	9,3960	3,132	4	600	
Балочное волнистое железо (толщина δ = 1 мм)									
✓21a	60	30	12,24	0,95	1,0530	0,702	10	600	1,8
✓29	100	50	12,24	1,57	4,9250	1,970	6	600	
43	160	80	12,24	2,51	19,9680	4,992	4	640	
44	160	100	14,19	2,91	32,0000	7,000	4	640	

Момент инерции для одной волны гофрированного плоского железа определяется из формулы:

$$J_1 = (0,11 b + 0,16 h) h^2 \delta \text{ в см}^4,$$

а для балочного — из формулы:

$$J_2 = (0,10 b + 0,19 h) h^2 \delta \text{ в см}^4.$$

Достаточно точно моменты сопротивления для тех же сортаментов соответственно могут быть выражены формулами:

$$W_1 = 2(0,11 b + 0,16 h) h \delta,$$

$$W_2 = 2(0,10 b + 0,19 h) h \delta.$$

Аналогично для площадей сечения можно привести следующие достаточно приближенные формулы для плоского железа:

$$\omega_1 = b \left(1 + 2,67 \frac{h^2}{b^2} - 6,4 \frac{h^4}{b^4} \right) \delta \text{ в см}^2$$

и для балочного железа:

$$\omega_2 = \left[1,57 b + \left(h - \frac{b}{2} - \delta \right) \right] \delta \text{ в см}^2.$$

Во всех приведенных выше формулах величины b , h и δ выражены в сантиметрах.

Толщина прокатываемого железа колеблется от 1 до 6 мм. Целые моменты сопротивления и массы, изображенные определены в табл. 8 пропорционально δ .

В табл. 8 фигурирует сортамент Прушковского завода, который несколько отличается от сортамента Петербургского завода. Тем не менее, указанные последние для гофрированной труб под наименованиями сортаменты $68 \times 34 \times 1$ мм и $60 \times 16,5 \times 1$ мм (последний недостаточно прочный, как показал опыт Оренбург-Ташкентской ж. д.) достаточно близки к 1-му и 3-му профилям Прушковского завода.

Данные о профилях железа Кнутсона приводятся в табл. 9.

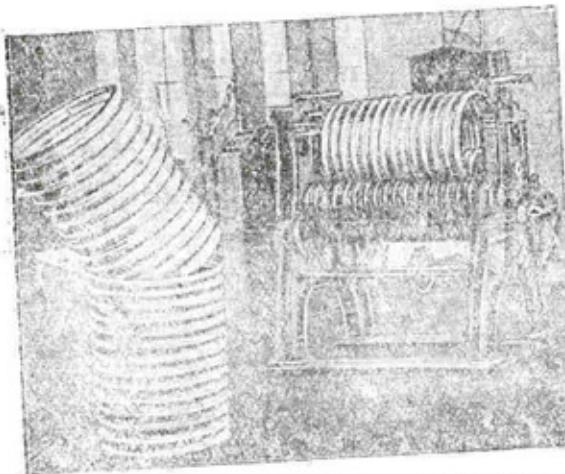
Бомбирование, т. е. процесс превращения прямого гофрированного металла в сводчатый, на указанных выше заводах производилось на специальном станке (фиг. 24). Станок имел 4 вальца, перемещая которые можно было получать железо различного радиуса кривизны.

Склепка в звенья на заводах производилась до длины в 2,13 м. Для малых труб длина звеньев несколько увеличивалась, но не более длины железнодорожной платформы, во избежание неудобств с погрузкой и перевозкой. Клепка производилась холодную, пневматическими молотками. Заклепки применялись из мягкого железа диаметром не более 8 мм. Края крайних звеньев усиливались наклепываемым уголком жесткости. Малые звенья труб большого диаметра склеивались из отдельных сводчатых кусков гофрированного железа по нескольким продольным швам. Трубы небольших диаметров при бомбировании изготавливались в виде

№ профильей	Размеры волны в мм		Масса 1 м ² в кг
	длина b	высота h	
150	75	1	12,75
150	75	1,5	19,15
150	75	2	31,5
200	100	1	15,1
200	100	1,5	23,5
200	100	2	41,4
200	100	3	60
200	100	4	80
200	100	5	100
200	100	6	120
200	100	7	140
200	100	8	160
200	100	9	180
200	100	10	200
200	100	11	220
200	100	12	240
200	100	13	260
200	100	14	280
200	100	15	300
200	100	16	320
200	100	17	340
200	100	18	360
200	100	19	380
200	100	20	400
200	100	21	420
200	100	22	440
200	100	23	460
200	100	24	480
200	100	25	500
200	100	26	520
200	100	27	540
200	100	28	560
200	100	29	580
200	100	30	600
200	100	31	620
200	100	32	640
200	100	33	660
200	100	34	680
200	100	35	700
200	100	36	720
200	100	37	740
200	100	38	760
200	100	39	780
200	100	40	800
200	100	41	820
200	100	42	840
200	100	43	860
200	100	44	880
200	100	45	900
200	100	46	920
200	100	47	940
200	100	48	960
200	100	49	980
200	100	50	1000
200	100	51	1020
200	100	52	1040
200	100	53	1060
200	100	54	1080
200	100	55	1100
200	100	56	1120
200	100	57	1140
200	100	58	1160
200	100	59	1180
200	100	60	1200
200	100	61	1220
200	100	62	1240
200	100	63	1260
200	100	64	1280
200	100	65	1300
200	100	66	1320
200	100	67	1340
200	100	68	1360
200	100	69	1380
200	100	70	1400
200	100	71	1420
200	100	72	1440
200	100	73	1460
200	100	74	1480
200	100	75	1500
200	100	76	1520
200	100	77	1540
200	100	78	1560
200	100	79	1580
200	100	80	1600
200	100	81	1620
200	100	82	1640
200	100	83	1660
200	100	84	1680
200	100	85	1700
200	100	86	1720
200	100	87	1740
200	100	88	1760
200	100	89	1780
200	100	90	1800
200	100	91	1820
200	100	92	1840
200	100	93	1860
200	100	94	1880
200	100	95	1900
200	100	96	1920
200	100	97	1940
200	100	98	1960
200	100	99	1980
200	100	100	2000

мелых звеньев, скленываемых в одном продольном шве. Эти звенья сращивались в более длинные клепкой по периферии трубы с шахматным расположением продольных швов.

В виду слабости монтажных швов звеньевых труб, соединяемых на месте гофрированными круглыми накладками и стягиваемых оцинкованной проволокой, а также неудобства транспортирования отдельных звеньев, признавалось более рацио-



Фиг. 24. Станок для бомбирозания гофрированного железа.

дышку. При этом трубе придается уклон в сторону стока с приложением середины трубы на 4—6 см. Это делается в виду возможности большей просадки трубы под местом наибольшего давления насыпи.

Труба заключается в глинистое ядро (см. фиг. 6), которое следует отсыпать равномерными слоями с трамбовкой. Засыпку ядра местным грунтом также производят равномерно с аккуратным послойным трамбованием. Трубу собирают из отдельных, присланных заводом звеньев, соединяемых накладками с цинковой проволокой, или склеивают целиком на месте из отдельных сводчатых секций. При клепке все швы и отверстия промазывают суриком. Первый способ сборки с эксплуатационной точки зрения является малоудовлетворительным.

Оголовки в виде стенок следует делать лишь при работе трубы под напором или при большой скорости протекания воды в водотоке.

Во всех остальных случаях можно ограничиваться отделкой горизонтальной каменной мостовой. В случае необходимости устройства оголовка рационально применение гофрированной подпорной стенки (см. фиг. 3).

Желательно во избежание истирания цинковой оболочки трубы покрывать нижнюю внутреннюю ее часть, до отметки несколько выше горизонта высоких вод, асфальтом или пёком. Дно выходного и входного отверстий должно быть вымощено камнем, на мху.

§ 7. Постройка гофрированных труб в США

А. Заводское изготовление

Процесс изготовления элементов труб на заводах США склонен с описанным выше для наших условий. Но для изготовления гофрированных труб применяется металл специальной марки Аттисо и №—Со—Ro. Железо Аттисо стоит значительно дороже обычного металла, что объясняется большой сложностью его изготовления.

Б. Производство работ из места

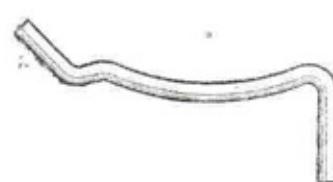
В качестве соединительных элементов между секциями труб, применяемых в США, употребляются специальные скрепы, заклепки и бомбированные накладки. Последние из перечисленных соединений являются несколько громоздкими, так как требуют довольно длительных клепальных работ. Более рационально применение особых скрепляющих деталей — скреп, которые значительно ускоряют сборку и разборку.

Полевые работы при сборке труб из звеньев в СИА аналогичны бывшему выше процессу работ, производимым у нас, и поэтому не изображение повторяется.

ПОСТАВЛЕНИЕ К СБОРКЕ ГОРМОРОВАННЫХ ПРУЗ СО СПЕЦИАЛЬНЫМИ СОЕДИНЯТЕЛЬНЫМИ ЭЛЕМЕНТАМИ — СКРЕПАМИ

Соединение гофрированных труб специальными скреплениями отличается простотой, облегчает и ускоряет процесс сборки и гарантирует достаточную прочность.

Для производства работ необходимы следующие инструменты: 1) деревянный молоток; 2) отвертка; 3) шило.



Фиг. 25. Скрепа для соединения санитарных труб диаметром от 20 до 38 см.



Фиг. 26. Скрепа для соединения секций труб диаметром от 46 до 92 см.

ствующей окружности трубы, снабженный зажимным патроном или крюком, и 4) железный стержень, служащий для накручивания цепи. Кроме того, необходимо иметь простое орудие для наложения скреп, которое легко может быть изготовлено и представляет собой железную полосу размером $46 \times 4 \times 1\text{ см}$ с отверстиями диаметром 10 мм на каждом конце. Бывает полезно иметь деревянный брускок длиной несколько меньшей диаметра трубы.

Для труб диаметром от 20 до 38 см включительно применяют скрепы, изображенные на фиг. 25.

Для труб диаметром от 46 до 92 см включительно применяют скрепы, изображенные на фиг. 26.

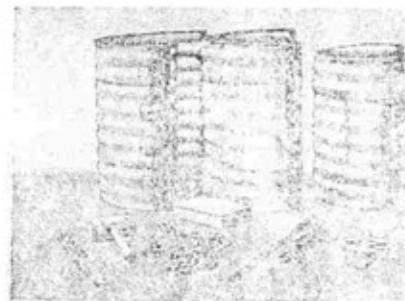
Части труб (фиг. 27) изготавливаются четырех типов: 1) взаимозаменяемые верхние половины входной и выходной частей длиной 0,3 м (1 фут), 2) нижние половины входной части, 3) верхние половины входной части обычной — нормальной длины и 4) такие же нижние половины. Каждый тип труб обычно упаковывают в особые пачки. Если длина трубы равняется нечетному числу футов, то верхняя половина входной части длиной в один фут не берется, а вместо нижней половины обычной длины ставится половина однофутовая (0,3 м).

Основные моменты сборки следующие: листовое железо, предохраняющее края каждой пачки, снимают (фиг. 28). Части труб, собранные в пачку, отделяют одну от другой посредством отвертки (фиг. 29). Сборку труб всегда следует начинать с нижней половины входной части и кончать выходной. На этих половинах имеется стрелка, указывающая

направление движения воды. Так как части при перевозке могут помяться, то следует убедиться в том, соответствует ли в точности расстояние между их краями нормальному диаметру трубы. Это измерение (фиг. 30) нужно произвести очень тщательно, так как неправильности в первом звене трубы отразятся на всем процессе дальнейшей сборки.

Если диаметр оказался больше нормального, то его нужно уменьшить. Это достигается ударами части трубы о землю, как показано на фиг. 31. Увеличение диаметра, если он меньше нормального, можно получить бросанием части трубы с некоторой высоты на землю (фиг. 32). Затем необходимо просмотреть все выемки на нижних частях труб и если некоторые из них окажутся не в исправности, то им нужно придать должный вид посредством лома или отвертки (фиг. 33). После этого следует расположить нижнюю половину входной части так, чтобы стрелка была обращена по тому направлению, в котором будет производиться сборка. Затем нужно наложить верхнюю часть, слегка ударяя молотком, как показано на фиг. 34. Края верхней части должны плотно войти в выемки нижней. В начале сборки всегда берут верхнюю часть половиной длины (1 фут), за исключением тех случаев, когда длина собираемой трубы равняется нечетному числу футов. В каждой верхней половине трубы отверстия для скреп помещаются на второй волне от входного отверстия и на третьей волне от выходного; в нижних частях они помещаются на третьей волне, считая от того и другого края. Такое расположение отверстий делает невозможным иную сборку кроме предусмотренной.

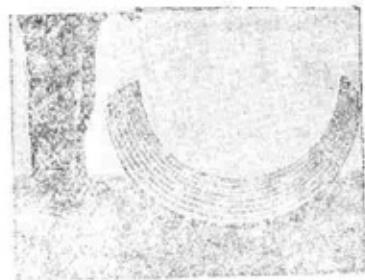
После того как в отверстия вставлена скрепа (фиг. 35), следует полосу, служащую для загибания, подвести под выступающий конец вставленной скрепы (фиг. 36). Чтобы труба во время загибания скрепы



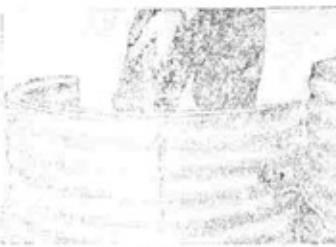
Фиг. 27. Части труб в упакованном виде вместе со скрепами и инструментом для сборки.



Фиг. 28. Снятие листового упаковочного железа, предохраняющего края секций труб от повреждений.



Фиг. 32. Удлинение диаметра секции.



Фиг. 29. Разделение пачки труб на отдельные секции.



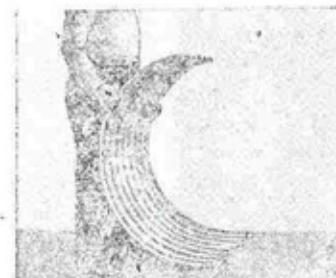
Фиг. 33. Выправление соединительных выемок секции.



Фиг. 30. Проверка размера диаметра.



Фиг. 34. Закладывание верхней торцовой половники.



Фиг. 31. Укорочение диаметра секции трубы.



Фиг. 35. Закладывание скрепы.

оставалась в устойчивом положении, следует подставить деревянный бруск (размеры его различны в зависимости от диаметра трубы). Если такого бруска под руками нет, то удерживать трубу в нужном положении может рабочий (фиг. 37).

Верхние части нормальных размеров (2 фута) укрепляются несколько иначе. Все двухфутовые верхние части во время процесса скрепления должны удерживаться цепью с железным стержнем. Чтобы цепь примила нужное положение, следует ударять молотком, как показано на фиг. 33. Когда с той и другой сторон скрепление будет произведено (фиг. 39), то можно передвинуть цепь к следующим отверстиям (фиг. 40).

Поочередное прикрепление верхних и нижних частей должно продолжаться до тех пор, пока нижняя часть не достигнет той длины, которую должна иметь вся труба. Прикрепив тогда однофутовую часть, сборку заканчивают (фиг. 41). Прикрепление этой последней верхней части должно производиться при надетой цепи, хотя обычно цепь применяют лишь при скреплении двухфутовых частей.

Общий вид собранной трубы приводится на фиг. 42, а монтажная ее схема показана на фиг. 43.

При трубах диаметром в 107 см и больше вместо описанных скреп употребляют крюки, петли и гайки (см. фиг. 12). Верхние части должны быть укреплены цепью до того, как крюк и петля будут помещены в отверстия.

В случае укладки гофрированных труб в уже насыпанные плотно слежавшиеся насыпи путем отрыва земли сверху необходимо придерживаться следующих правил.

Ширина рва, в который укладывается труба, должна быть приблизительно на 30 см больше диаметра трубы. Дно должно быть ровным и закругленным соответственно форме трубы. Крупные камни должны быть удалены. Вырытую землю отсыпают только на одном краю рва, а на другом производится сборка трубы (фиг. 44). Если почва оказывается очень рыхлой, то дно рва покрывают слоем гравия толщиной от 15 до 30 см. Когда труба собрана, ее укладывают в ров чаще всего при помощи веревки. Шов сопряжения непременно должен находиться по бокам трубы, но ни в коем случае сверху или снизу (фиг. 45). Следует особенно тщательно производить засыпку и трамбовку до тех пор, пока слой земли не достигнет высоты $\frac{3}{4}$ диаметра трубы. Под трубой и по бокам ее ни в коем случае не должно быть пустых промежутков (фиг. 46). Над трубой на высоту, равную половине ее диаметра, должна находиться особенно плотная земля без крупных камней (фиг. 47). Верхняя часть рва может быть засыпана без особых предосторожностей. Весь слой земли над трубой не может быть меньше 30 см или полуторной длины ее диаметра (фиг. 47). Хотя гофрированные трубы и отличаются прочностью, тем не менее соблюдение всех только что перечисленных требований необходимо. Невыполнение правил может вызвать для труб, находящихся под большим давлением, увеличение горизонтального диаметра, пока не появится надлежащий отпор, что приведет к нежелательному искажению очертания трубы.

Трубы, укладываемые под свеженасыпанные насыпи, находятся под значительно большим давлением, чем во рвах. Поэтому здесь особенно нужно следить за надлежащей отсыпкой и трамбовкой слоя земли высотой



Фиг. 36. Загибание скрепы на бруске.



Фиг. 39. Загибание скрепы при затянутой стяжной цепи.



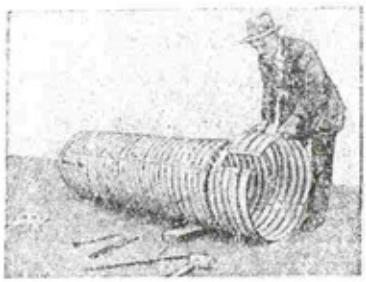
Фиг. 37. Загибание скрепы без бруска.



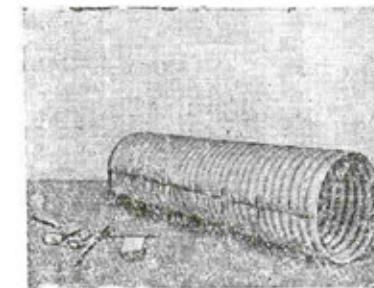
Фиг. 40. Перекладка стяжной цепи к торцу секции.



Фиг. 38. Закладывание верхней секции нормального размера.



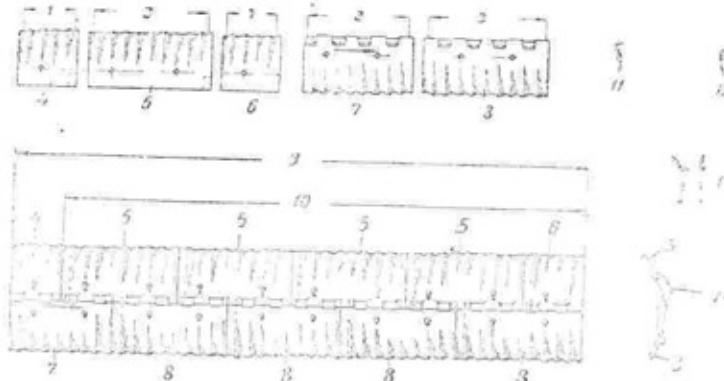
Фиг. 41. Закладка последней секции — верхней половины выходного конца трубы.



Фиг. 42. Собранный труба с инструментом для сборки.

в пределах $\frac{3}{14}$ диаметра трубы. Кроме того, поверх указанного плотно утрамбованного слоя необходимо обсыпать убу на высоту до трех ее диаметров землей. Отсыпку нужно вести равномерно по обе стороны трубы, чтобы не создавалось односторонних распоров (фиг. 48). Дальнейшую отсыпку насыпи ведут обычным способом.

При прокладке больших труб (диаметром в 1,5 м и больше) хорошие результаты дает применение подпорных стоек, помещаемых между двумя лежнями (фиг. 49). Высота стоек равна диаметру трубы, уменьшенному на толщину лежней. Толщина лежней обычно берется в 10 см, а ширинна — равной ширине стоек. При засыпке и трамбовке следует обратить особое



Фиг. 43. Монтажная схема трубы:

1 — четыре полины, 2 — восемь волни, 3 — девять волн, 4 — верхняя входная половина, 5 — верхняя половина нормальной длины, 6 — верхняя выходная половина, 7 — входная нижняя половина, 8 — нижняя половина нормальной длины, 9 — трубы четных длин в футах, 10 — трубы нечетных длин в футах, 11 — скрепа для труб диаметром от 20 до 38 см, 12 — скрепа для труб диаметром от 46 до 92 см, 13 — крюк с гайкой и петля для труб диаметром в 107 см и более, 14 — скрепа.

внимание на то, чтобы обе стороны трубы засыпались равномерно и не было ударов крупных камней о трубы. Деревянные стойки нужно по возможности сохранять до того момента, пока насыпанная земля не осидет, в то же время их необходимо убрать до первого сильного дождя.

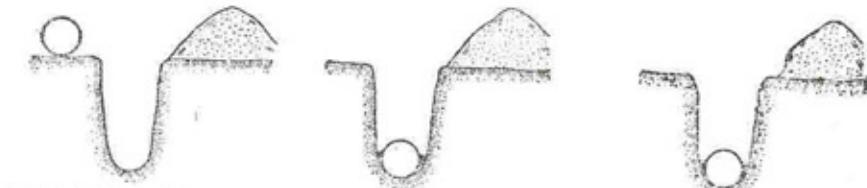
Устройство глиняного ядра вокруг гофрированной трубы в американской практике не требуется в отличие отrazil, принятых при постройке этих труб у нас до 1914 г.

В. Укладка труб с помощью домкратов¹

В США не очень давно предложен способ укладки труб в уже готовые насыпи, задвигая их сбоку с помощью домкратов, на подобие работы со щитами. Первый опыт подобного рода был произведен в 1911 г. на железной дороге Chicago Great Western, при этом гофрированная труба была уложена под насыпью высотой в 10,7 м.

¹ Bulletin American Railway Engineering Association, т. 33, № 356, июнь 1933, стр. 355.

Proceedings thirty-eighth Annual Convention of the American Railway Bridge and Building Association, октября 1928, стр. 27.



Фиг. 44. Схема расположения трубы перед укладкой в ров.

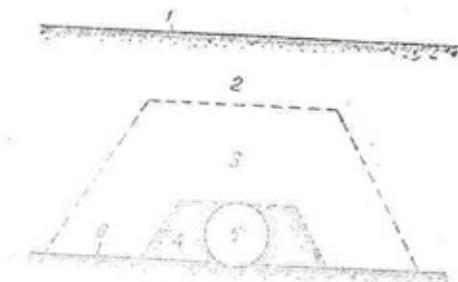


Фиг. 45. Схема расположения швов трубы после укладки до засыпки.

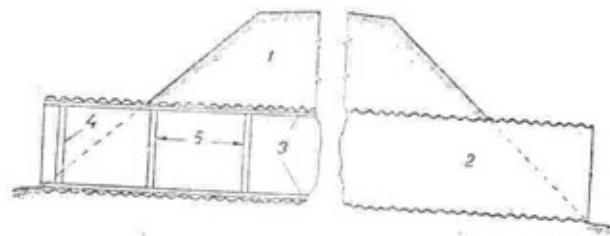
Фиг. 46. Заполнение пространства между боками и низом трубы и рвом.



Фиг. 47. Засыпанная труба.



Фиг. 48. Укладка трубы под насыпью:
1 — земляная насыпь, 2 — грунт, отсыпаемый обычным способом, 3 — грунт, отсыпаемый равномерно по обе стороны трубы, 4 — грунт, тщательно отсыпаемый и трамбованный, 5 — труба, 6 — естественный грунт.



Фиг. 49. Применение подпорных стоек в трубе при отсыпке насыпи:

1 — насыпь, 2 — стойки убраны, 3 — лежни, 4 — стойка, 5 — расстояние от 1,2 до 1,8 м.

Этот способ дает известную экономию и позволяет в случае необходимости устроить трубу без разрыва насыпи. Поэтому он должен найти широкое распространение и у нас.

Способ укладки труб с помощью домкратов был опробован на 26 железных дорогах США (Северная Тихоокеанская, Большая Северная, Нью-Йоркская центральная, Атлантическая береговая линия и т. д.), в Государственном дорожном отделе в Огии, рядом фирм и организаций.

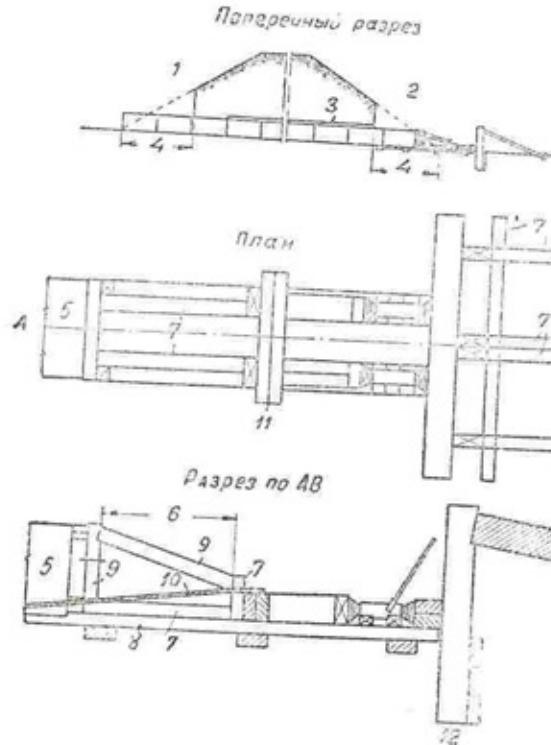
Применяемые для укладки в насыпи домкратами гофрированные трубы берутся наиболее мощного калибра.

Трубы диаметром от 0,61 до 1,73 м прокладывают при помощи домкратов без специального бурового оборудования. Рекомендуется этот способ укладки применять для труб диаметром не менее 1,07 м, так как

трубы меньших диаметров труднее проводить через насыпи, а получаемая экономия или очень незначительна, или сводится к нулю.

В случае применения соединительных частей в виде заклепок, в секциях труб, для монтажной клепки, на заводе должны быть просверлены отверстия. Длина секции, подлежащей сращиванию в процессе задвигания, обычно берется около 3,5—5,5 м.

Количество и мощность домкратов, потребных для задвигания трубы, определяются диаметром и длиной ее и материалом насыпи. Для обычных условий требуется два пятнадцатитонных путевых домкрата и два быст-



Фиг. 50. Схема установки с двумя домкратами для укладки труб:
1 — верхняя сторона, 2 — нижняя сторона, 3 — выемка земли производится на 2,5 см вверх и по бокам от трубы, 4 — расстояние 4,6—6,1 м, 5 — труба, 6 — расстояние 1,3 м, 7 — брусья сечением 18×40 см, 8 — направляющие брусья 18×40 см, 9 — брусья 20×20 см, 10 — лоски 5×30 см, 11 — брусья сечением 18×40, длиной 180 см, 12 — брусья сечением 18×40, длиной 300 см. Размеры даны для трубы диаметром 107 см.

действующих домкрата по 50 или 75 т с большим подъемом и шаровой головкой штока. Высота подъема домкратов, во избежание частой перевозки, должна быть не менее 30 см. Работы обычно начинаются домкратами малой мощности, а после того, как продвигание трубы для них станет слишком тяжело, переключаются на работу с большими домкратами.

Малые домкраты в дальнейшем могут быть использованы для предварительного обжатия прокладок и для других вспомогательных работ.

Бригада рабочих обычно состоит из: десятника, землекопа, рабочего, нагружающего вынутой землей тачку или другой какой-либо вид транспортного средства, рабочего, перевозящего землю, и двух рабочих, работающих на домкратах.

В случае труб большой длины и труднопроходимых грунтов на каждый домкрат требуется по два рабочих, если же проходка трубы идет быстро, то требуется второй рабочий на откатку земли.

При благоприятных условиях за восьмичасовой рабочий день указанная бригада может дать проходку от 3 до 5 м.

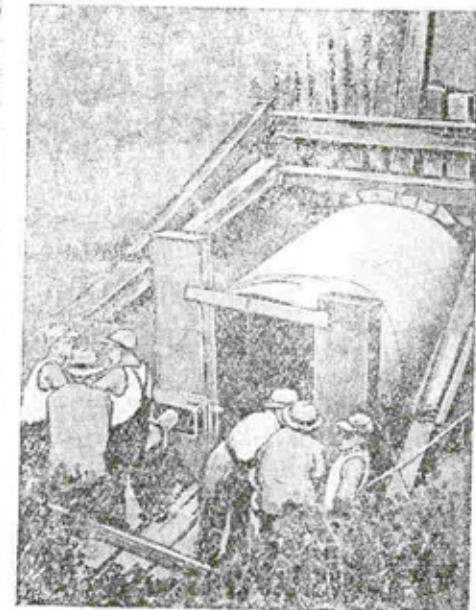
Части трубы, доставленные на обочину полотна, передвигают к месту укладки обычно с помощью канатов. Это транспортирование следует производить осторожно, чтобы не повредить концов секций трубы и не вызвать таких деформаций, которые бы потребовали предварительного их выпрямления до начала работ.

Перед началом проводки труб через насыпь необходимо выбрать из края насыпи, так называемую, подходную траншею с тем, чтобы перед проводимой трубой образовать вместо откоса вертикальную плоскость. Наиболее экономичная длина этой траншеи и ее выемки по направлению подвижки определяется путем экономического сравнения стоимости выборки траншей и стоимости проходки трубы. Для высоких насыпей наиболее экономичной в большинстве случаев длиной траншеи является величина в 4,5—6 м. При этом, конечно, не должна быть нарушена устойчивость насыпи. Для труб большой длины, для обеспечения работы в последние моменты проходки, рекомендуется делать такую же траншею с противоположной стороны для проводки трубы на этом участке в открытую. Если же проходка такой трубы к концу работ идет быстро, то делать такую траншею с другой стороны насыпи, конечно, нецелесообразно.

Выемка земли из подходной траншеи обычно производится вручную, однако, вполне возможно применение и различных имеющихся в распоряжении механизмов.

Обычно при проводке трубы домкратами ее направляют не горизонтально, а несколько наклонно вверх. Это делается для возможности стекания с места работ воды, дренажирующей через насыпь, и во избежание затопления пройденной части трубы при ливнях. Следует заметить, что проходка трубы ведется обычно со стороны выходного оголовка.

В некоторых случаях, допускающих устройство в насыпи шахты, проходка трубы ведется из шахты в обе стороны. Этот способ упрощает крепление и несколько уменьшает длину трубы, проводимой домкратами. Недостаток этого способа заключается в более сложном транспортиро-



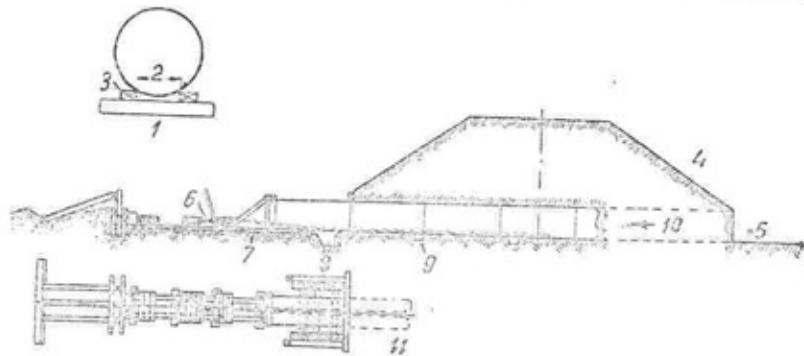
Фиг. 51. Закладка двумя домкратами трубы $d=2,13$ м, длиной 15 м, при высоте насыпи 4,25 м.

вании вынутой земли, которая должна быть подана на поверхность сначала по трубе, а потом по шахте.

Конструкция устройства для упора домкратов и передачи их давления на трубу зависит от грунта насыпи, места установки упорных элементов и длины трубы.

Большой частью применяется установка, приведенная на фиг. 50 и 51. Нередко также (см. табл. 10, стр. 41) употребление установки с одним домкратом (фиг. 52 и 53).

Правильность движения трубы обеспечивается направляющими брусками, по которым она под действием домкрата перемещается. Эти бруски укладываются в подходной траншее вплоть до вертикальной стенки насыпи. Укладку производят как в плане, так и по вертикали очень точно, так как от этого зависит будущее положение трубы в насыпи. Чтобы труба



Фиг. 52. Схема обустройства при проходке труб через насыпь с одним домкратом:

1 — деталь изгибающего устройства, 2 — расстояние, разное положение диаметра трубы, 3 — различные брусья, 4 — верхняя сторона, 5 — подходная траншея, 6 — 50-тонный домкрат, канищающегося на наружной поверхности трубы, 7 — траншеи для клепки труб, 9 — траншеи для очистки грунта, 10 — направление течения водотока, II — труба.

получила определенное направление в земляной массе, домкраты располагают из определенном расстоянии от вертикальной стенки траншеи, в которую входит труба в начале работ.

Упор для передачи давления на трубу представляет собой (фиг. 50 и 54) раму из брусьев, которая должна давать возможность прохода через нее откатчика грунта с тачкой или тележкой. Эта рама, плотно прилегая к торцу трубы, обеспечивает вполне удовлетворительную передачу давления домкрата. Какой-либо отделки для врезания в грунт передняя секция гофрированной трубы не имеет.

После окончания всех подготовительных работ — выемки подходной траншеи, сооружения упорных устройств и направляющих — приступают к процессу проходки трубы.

Собранный указанной выше длины секцию трубы накатывают на направляющие и устанавливают передним, по направлению проходки, концом впритык к вертикальной стенке насыпи в траншее (фиг. 55). При этой работе возможно применение домкратов малой мощности. Затем начинается выемка грунта изнутри трубы. Входное отверстие в насыпи

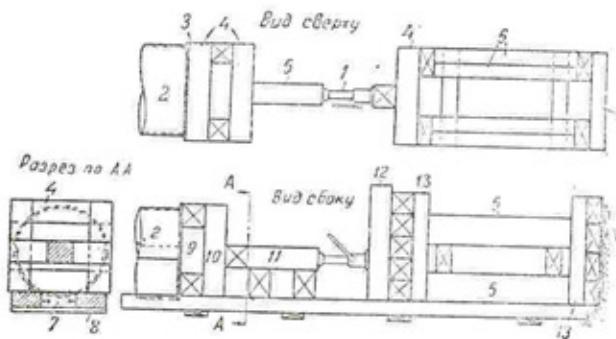
делает на уровне нижней части трубы и приблизительно на 2,5 см от стенок трубы с боков и сверху. Землекоп отбрасывает вынутую землю в трубу, где ее погружает другой рабочий на тачку или тележку. Откатчик вывозит вынутую породу к месту выгрузки. Иногда бывает необходимо в помощь откатчику ставить у места выхода из трубы к домкратной установке на уклоне (см. фиг. 50 и 52) подручного. Продвижение трубы продолжается без перерыва до тех пор, пока выдвигаемые поршины домкратов не дойдут до своего крайнего положения. После перезарядки домкратов и установки дополнительных прокладок операция повторяется и продолжается так до тех пор, пока не освободится место для следующей секции трубы (фиг. 56).

В процессе проходки следует внимательно следить за направлением трубы в профиле и плане. Это наблюдение ведется с помощью теодолита и нивелира.

В случае применения проходки гофрированных труб с помощью домкратов в литературе рекомендуется применять в качестве элементов соединения заклепки. Во всяком случае, упоминания о других более рациональ-



Фиг. 53. Закладка одним домкратом трубы $d=1,37$ м, длиной 11,6 м, при высоте насыпи 3,65 м.

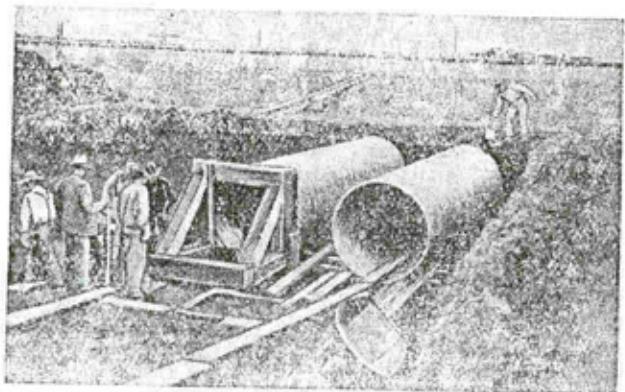


Фиг. 54. Деталь установки домкрата:

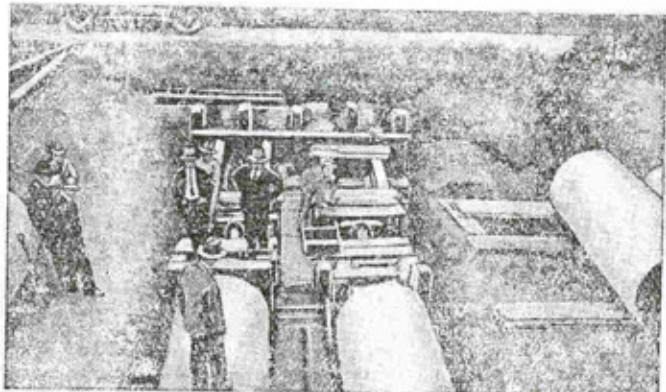
1 — домкрат, 2 — траншея, 3 — слой толщиной 6—10 см, 4 — брусья 30×30 см, длиной 120—150 см, 5 — брусья 30×30 см, 6 — брусья 30×40 см, длиной 120—150 см, 7 — расстояние 45 см, 8 — доска 30×8 см, 9 — брусья 30×30×70 см, 10 — брусья 30×30×130 см, 11 — брусья 30×30 см, 12 — брусья 30×30×100 см, 13 — брусья 20×40×150 см.

ных в смысле быстроты работы соединения (скрепы, крюки и т. д.), применяемых при таком производстве работ, нет. Для возможности склеивания между собой отдельных секций трубы длиной, как

указывалось, 3,5—5,5 м, в процессе проходки и закладывания следующего звена требуется сделать выемку под трубой примерно в 50 см шириной и глубиной, расположенную под прямым углом к оси трубы (см. фиг. 50 и 52). Рекомендуется места швов усиливать гофрированными накладками, помещаемыми с внутренней стороны. Заклепки должны быть поставлены в нагретом состоянии, но допускается и холодная клепка.



Фиг. 55. Установка секций двухочковой гофрированной трубы в подходной траншее.



Фиг. 56. Процесс задвигания двухочковой гофрированной трубы.

Выборку грунта производят обычно лопатами или кирками с короткими ручками. Иногда применяется и топор с закругленным лезвием и короткой ручкой. Для ускорения работ при наличии соответствующих установок применяется пневматика, в том числе, в случае попадания каменных пород, и перфораторы.

Выборку грунта впереди трубы производят обычно на расстояние от 0,3 до 0,6 м. Это расстояние зависит от грунта и расположения ездового полотна по высоте над трубой. В особо благоприятных грунтах это

расстояние можно доводить до 1,2 м. Вообще говоря, производить выборку пород на большом расстоянии от трубы опасно.

При коротких трубах большого диаметра можно обходиться и без искусственного освещения, но в большинстве случаев все же применяется керосиновое освещение лампами типа "летучая мышь".

Вывозка грунта обычно производится, если позволяет диаметр трубы, тачкой. Для коротких труб достаточно иметь одну тачку, для труб большой длины, скорость проходки которых превышает 30 см в час, желательно иметь две тачки.

Существует еще метод удаления вынутого грунта посредством погрузки его на плоскодонную вагонетку на колесах, движущуюся взад и вперед при помощи каната. У конца трубы грунт из вагонетки перегружают в тачку и отвозят к месту выгрузки.

В неустойчивых грунтах способ проведения труб при помощи домкратов не может применяться вполне успешно, поэтому, прежде чем предпринимать такого рода работу, необходимо произвести тщательное исследование. В сомнительных случаях для установления характера грунтов желательно произвести бурение насыпи. Если в неустойчивых грунтах все же решено будет применить подобный способ работы, то необходимо стремиться к непрерывному ведению проходки для уменьшения стремления материала насыпи к налипанию вокруг трубы. Песчаные грунты, насыщенные водой, могут быть обезвожены с помощью трубчатых дренажных колодцев, что может дать благоприятные результаты. Если труба начинает застrevать, работа может быть закончена встречной проходкой при помощи домкратов с противоположной стороны насыпи. Сопротивление продвиганию, вызванное налипанием грунта в желобках труб, может быть уменьшено путем прикрепления полос листового железа вдоль внешней поверхности трубы.

Для уменьшения сопротивления прохождению трубы через насыпь ряд американских инженеров рекомендует смазывать их снаружи маслом.

Подходная выемка должна быть по сторонам к рабочему забою тщательным образом укреплена и обшита.

Во избежание подмыва и просачивания воды между трубой и насыпью необходимо засыпку подходных траншей вокруг трубы хорошо утрамбовать. Кроме того, в некоторых случаях выемка грунта в последней части трубы может быть сделана несколько меньшего объема, чем труба, чтобы увеличить сопротивление просачиванию у входного оголовка.

Для предохранения от подмыва следует устраивать бетонную мостовую или камениную отмостку. Если насыпь неплотно обхватывает трубу, остающееся пространство может быть заполнено смесью грунта с цементом (примерно $1\frac{1}{4}$ мешка цемента на 1 м³ земли).

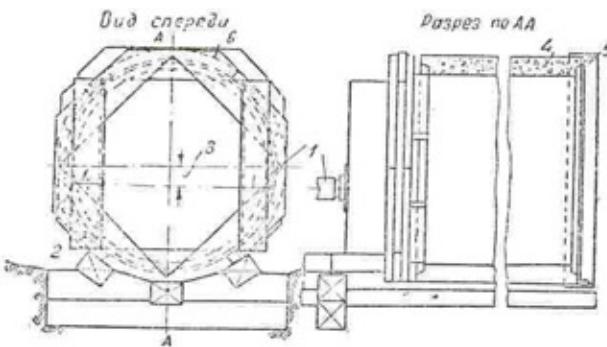
Если труба может работать под напором в течение продолжительного времени при наличии легкоразмываемой породы насыпи, то, кроме отмостки и мостовой, необходимо трубу заключать в оголовки.

Кроме того, в исключительных случаях в выходных отверстиях для рассеивания энергии вытекающей воды полезно устраивать водосбросы.

Описанный способ укладки гофрированных труб может быть применен и к другим типам труб, в том числе и железобетонным (фиг. 57). Железобетонные и чугунные трубы требуют благодаря большему весу также и домкратов большей мощности. Кроме того, этим трубам обычно

Таблица 10

Грунт	Высота насыпи в м	Тип трубы	Диаметр трубы в м	Длина трубы в м	Число колей железной дороги	Угол между осью трубы и дорогой в °	Сметная экономия по сравнению с укладкой обыч- ным способом в %	Количество и мощность домкратов
Твердая, синяя глина, песок с галькой	3,0	Гофрированная; калибр 10	0,92	18,3	2	90	58	1—25 т
Твердая, желтая глина, суглинки и синяя глина	7,3							
То же	7,6	Гофрированная; калибр 8 и 10	1,07	30,4	1	90		
*	8,5		1,22	35,2	1	90		
*	13,7			39,5	1	90		
*	20,4			1,52	50	1	90	
*	6,7	Чугунная	от 0,3 до 0,92			90		
Различный	Различная	Чугунная	от 0,3 до 1,22	Различные	—	—	—	—
Твердый подпочвенный слой и немного гальки	6,1	Гофрированная	1,83	27,4	3	10	25	2—25 т (2—100 т)
Гравий, глина и твердый подпочвенный слой	7,3	Гофрированная	1,52	16,4	1	90	40	2—35 т
Мокрая глина и песок	3,5	Гофрированная; калибр 10	1,22	46,5	10	90	—	2—50 т
Глина	4,25	То же	1,22	17,0	1	90	10—20	2—50 т
Глина с гравием, плавун	10,7	Гофрированная; калибр 10	1,07	24,3	1	99	66	2—50 т
Крупный гравий и песок	4,56	Железная	1,22	21,9	2	90	57	—
Глина	3,65	То же	0,76	18,3	2	90	—	2—30 т
Твердая глина	5,73	Гофрированная; калибр 8	1,22	16,4	1	90	66	1—35 т
Желтая глина	6,38	То же	1,22	18,3	1	90	60—70	3—35 т (1—75 т)
То же	6,68	Гофрированная; калибр 12	0,92	21,9	1	90	25	—
*	5,17	То же	1,07	19,8	1	90	25	—
*	5,46	*	0,92	19,8	1	90	25	—
Черный перегной	3,65	Гофрированная; калибр 10	1,22	14,6	1	90	25	—
Твердая глина	4,56	Гофрированная; калибр 10	0,92	8,5	1	90	—	—



Фиг. 57. Детали упорной рамы и направляющих устройств для железобетонной трубы:

1 — домкраты, 2 — направляющие брусья, 3 — расстояние 15 см, 4 — железобетонная труба, 5 — режущее ребро из листа толщиной 6 мм, 6 — рама, сбачиваемая или сбивающая гвоздями.

придают впереди режущие ребра, а иногда и направляющие салазки, так как они имеют тенденцию благодаря весу зарываться вниз.

В виду хрупкости материалов этих конструкций затруднен также транспорт железобетонных и чугунных труб до места установки их для проходки. Необходима большая предосторожность для избежания выкалывания бетона или откола чугунных частей.

Указанные недостатки других типов труб, в применении способа укладки их в насыпь с помощью домкратов, явились причиной того, что данный метод в наибольшем числе случаев применялся при сооружении гофрированных труб. В этом нетрудно убедиться, просмотрев прилагаемый неполный список труб, уложенных с помощью домкратов на различных железных дорогах США по данным на 1928 г. Из 32 случаев, приведенных в табл. 10, 25 (или свыше 75%) падает на гофрированные трубы.

Рассматривая табл. 10, можно констатировать, что гофрированные трубы, задвинутые в насыпь с помощью домкратов:

- достигают максимального диаметра 1,83 м
- имеют максимальную длину 50 м.

Значительный процент стоимости постройки гофрированных труб падает на собственно трубу, как материал. Последняя стоимость по отношению к полной стоимости постройки составляет в среднем около 65%. Это обстоятельство несомненно мешает более четко выразить экономию в суммарной стоимости сооружения, полученную в зависимости от способа ведения работ (укладка трубы домкратами по сравнению с обычным открытым способом).

Применение домкратов не является единственным способом прокладки труб через уже отсыпанную насыпь. Этую работу можно также выполнить тоннельным способом. Этот способ требует довольно большого количества леса (фиг. 58). Применяется тоннельный способ главным образом для прокладки железобетонных и бетонных труб.

Фиг. 58. Деталь крепления тоннеля.

Продолжение табл. 10

Грунт	Высота насыпи в м	Тип трубы	Диаметр трубы в м	Длина трубы в м	Число колей железной дороги	Угол между осью трубы и дорогой в °	Сметная экономия по сравнению с укладкой обыч- ным способом в %	Количество и мощность домкратов	
								1—35 т	1—50 т
Желтый песок . . .	18,2	Железная	0,15	53,6	1	90	—	—	—
Глина	6,7	Труба сварочного же- леза	0,25	34,7	3	90	33	1—35 т	1—50 т
Глина	7,6	Гофрирован- ная; калибр 10	1,22	23,2	1	90	66	—	—
Мелкий песок с глиной	7,3	То же	0,92	27,4	2	90	50	4—50 т	{ 2—50 т
Песок и немного гравия	2,75	Железобетонная	1,22	29,2	4	42	—	{ 2—50 т	{ 3—75 т
—	—	Гофрирован- ная	1,07	20,7	—	—	—	—	—
Черная глина, же- лезная глина . . .	3,0	Гофрирован- ная; калибр 8	1,52	19,8	1	90	50	{ 2—15 т	{ 2—50 т
Глина	2,75	Гофрирован- ная	0,92	19,8	2	90	90	—	—
—	5,17	То же	0,92	20,0	1	90	90	—	—
—	2,43	—	0,92	13,9	1	90	90	—	—

О домкратной прокладке гофрированных труб через насыпи можно сделать следующие выводы.

Прокладка труб через насыпи домкратами является вполне технически осуществимой. По этому методу были проведены трубы почти во всех грунтах, начиная от синей глины и кончая пльвуном. Этот способ дает экономию при производстве работ от 30 до 50% по сравнению с обычным открытым способом и является более дешевым по отношению к тоннельному методу работ.

Основные преимущества способа:

- 1) обычно низкая стоимость работ;
- 2) отсутствие необходимости в перерывах движения;
- 3) минимальное повреждение полотна дороги и малая усадка насыпи.

Этот метод особенно рекомендуется применять при высоких насыпях, большом движении и при грунтах, хорошо держащихся и обеспечивающих образование в насыпи разгружающих сводов (глина).

Работу следует вести по возможности без больших перерывов, так как известен случай на магистрали Лакавания—Вестерн (США), когда остановленная на два дня работа по продвижению через насыпь гофрированной трубы $d = 1,83$ м не смогла дальше продолжаться, так как трубу

не могли сдвинуть. Работу удалось закончить встречной проходкой других секций с противоположной стороны насыпи.

При неустойчивых грунтах и насыпях, содержащих в себе валуны, обломки горных пород, стоимость работ будет более высокой. Однако, и в этом случае способ домкратной прокладки гофрированных труб может быть применен.

Прежде чем остановиться на применении метода укладки труб с помощью домкратов, следует проанализировать все условия работы, и если экономичность такого способа окажется сомнительной, то необходимо провести сравнительную экономическую оценку с укладкой труб открытым и тоннельным способами. При этом необходимо учитывать расходы, связанные с перерывом движения и дополнительным уходом за насыпью при ее уплотнении в случае применения открытого способа.

Все приведенные выше соображения относительно экономичности применения домкратного метода работ справедливы лишь при условии наличия уже отсыпанной насыпи. Это может иметь место при исправлении строительной ошибки или замене старой, подлежащей смене, трубы.

Глава IV

ЭКСПЛОАТАЦИОННЫЕ ДАННЫЕ

§ 8. Архивные данные нашей страны

Управление железных дорог в начале 1913 г., после того как стали известны отрицательные результаты применения гофрированных труб на Оренбург-Ташкентской ж. д., провело зиккут о службе этих труб на всех дорогах, где они были построены.

К началу 1914 г. этому Управлению удалось получить эксплоатационные данные от некоторых дорог. По этим данным можно признать, что гофрированные трубы являются вполне надежной конструкцией со сроком службы не менее 30 лет.

По частным сведениям автора, в настоящее время проводится замена гофрированных труб на дорогах Средней Азии. Это показывает, что срок службы гофрированных труб действительно может быть принят не менее, чем указано выше.

§ 9. Эксплоатационные данные США

Гофрированные трубы в США впервые стали применять в качестве водопропускных сооружений на шоссейных дорогах свыше сорока лет тому назад. На железных дорогах эти трубы появились несколько позже, примерно около 1907 г.

В большинстве случаев трубы уложены под насыпями высотой от 9 до 12 м, небольшое количество труб находится в насыпях высотой от 15 до 24 м, а одна труба уложена под насыпью высотой в 38 м. Эта труба уложена на Восточно-Тихоокеанской ж. д., имеет диаметр $d = 1,52$ м и построена из гофрированного металла калибра 10.

Данные на 1924 г. за период около 17 лет об эксплоатации на различных железных дорогах 10 000 труб, работающих в различных условиях

24 штатов США, показывают, что ниги все трубы находятся в хорошем состоянии. Многие трубы после семнадцатилетней работы имеют повреждение оцинковки. Несмотря на это, они вполне пригодны для дальнейшей службы, так как сделаны из чистого железа и без оцинковки хорошо сопротивляются коррозии.

Замечено также, что трубы под нагрузкой принимают несколько эллиптическое очертание, причем некоторые инженеры рассматривали это явление как признак начала разрушения трубы, и были случаи, когда вследствие этого происходили замены труб.

Лишь впоследствии в США пришли к убеждению, что такого рода деформация есть естественный результат поведения под нагрузкой гофрированной трубы вследствие ее эластичности.

Несмотря на то, что большое количество труб уложено без оголовков, эксплуатационные работники США все же рекомендуют применение оголовков, исходя из необходимости предотвращения подмыва трубы, ее истирания в концах, а также и по эстетическим соображениям.

Несмотря на оправдавшееся применение труб под весьма высокими насыпями, некоторые дороги (например, Southern Pacific) ограничивают применение труб из гофрированного железа высотой насыпи не более чем 3,6 м.

В некоторых случаях, для особо высоких насыпей или каких-либо других необычных условий, применяются трубы более сильного сечения, чем установленное нормальным сортаментом.

Калибры труб повышенной прочности меняются в зависимости от диаметров: для диаметра $d = 0,46$ м принимается калибр 12, для $d = 0,61$, $0,76$, $0,92$ и $1,07$ м берут калибр 10 и для $d = 1,22$ м — калибр 8.

Опыт укладки в США гофрированных труб в щелочных грунтах показал, что трубы, находящиеся в таких условиях, довольно скоро выбывают из строя. Так, например, уложенные на Восточно-Тихоокеанской ж. д. (Western Pacific) в окрестностях Gerlach (Невада) гофрированные трубы оказались под действием весьма насыщенного раствора хлористого натра и других солей. Крепость этого раствора была в три раза больше крепости морской воды. В результате действия этих солей трубы калибра 14 и 16 через 15 лет службы потребовали замены. Эти трубы были заменены трубами более мощными — калибра 10. Предполагают, что новые трубы будут служить в тех же условиях примерно в два раза дольше, чем смененные.

Таким образом, для местностей со щелочными грунтами срок службы труб обычных сортаментов следует принимать не свыше 15 лет. Для этих условий желательно применение более массивных конструкций, т. е. гофрированных труб более низкого калибра.

На той же Восточно-Тихоокеанской ж. д. широкое распространение получили гофрированные трубы при замене ими, начиная с 1912 г., большого количества деревянных труб, построенных в 1906—1908 гг. и уложенных под насыпями значительной высоты. Гофрированные трубы укладывались внутри деревянных прямоугольных конструкций, а оставшиеся промежутки тщательно затрамбовывались.

Эта работа облегчила замену старых деревянных труб в больших насыпях, так как не потребовала разрыва полотна и перерыва движения. Все уложенные таким образом трубы работали хорошо.

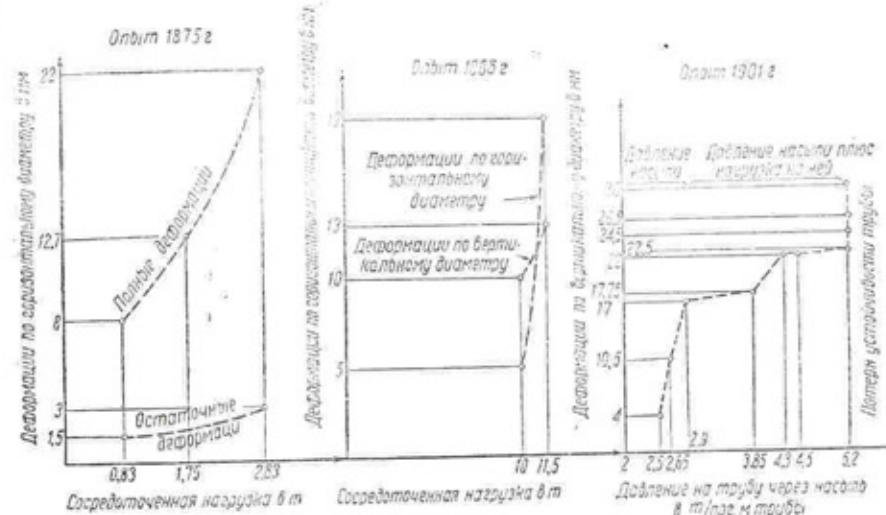
На этой дороге наблюдался довольно интересный случай, когда насыпь высотой в 20 м над трубой диаметром $d = 1,22$ м и длиной 69 м была после сильного ливня разрушена. После откопки трубы оказалось, что она при этом не пострадала.

Глава V

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ДАННЫЕ О ПРОЧНОСТИ И УСТОЙЧИВОСТИ

§ 10. Опыты Петербургского металлического завода

Исследования на Петербургском металлическом заводе производились с 1875 по 1901 г. Опыты не были достаточно тщательно обставлены и имели предварительный характер и узкую цель — выявить и продемонстрировать способность гофрированных труб выдерживать давление насыпей.



Фиг. 59. График результатов опытов, проведенных Петербургским металлическим заводом над гофрированными трубами.

стрировать возможность работы гофрированных труб в условиях и под нагрузкой, близкой к действительности при работе их под насыпями железных дорог.

Аппаратура, примененная при этих опытах, была самая примитивная.

За указанный выше период времени были поставлены три опыта: первый из них в 1875 г., второй в 1886 г., третий в 1901 г.

Данные всех трех опытов, графическая интерпретация которых приведена на фиг. 59, являются довольно разрозненными и мало эффективными с точки зрения получения каких-либо выводов о расчете труб или понимания условий их работы в насыпях.

Решение всякой подобной задачи должно быть построено на тщательном изучении явлений как внешних воздействий, так и внутренних усилий в конструкции.

§ 11. Опыты над гофрированными трубами в США

Опыты над гофрированными трубами в США велись в двух направлениях: в лабораторных и полевых условиях.

Лабораторные опыты ставились инж. Fowler'ом, профессором Иллинойского университета Talbot'ом, Marston'ом (Иовский государственный университет) и рядом фирм.

Опыты в полевых условиях ставились Американской ассоциацией железнодорожных инженеров и университетом Северной Каролины.

А. Лабораторные опыты

Опыты Georg L. Fowler'a (1916 г.)

Fowler производил испытания над двумя типами труб из гофрированного железа, помещая их в специальное каркасное устройство (фиг. 60), забранное со всех сторон толстыми досками. В двух стенках этого ящика были сделаны прорези, соответствующие очертанию трубы.

Были произведены испытания над трубами следующих размеров:

I труба — 0,61 м, калибр 14 ($d = 2$ дм), из железа Armco $68 \times 13 \times 2$ мк, II труба — 0,92 м, калибр 12 ($d = 2,75$ дм), из железа Armco $68 \times 13 \times 2,75$ мк.

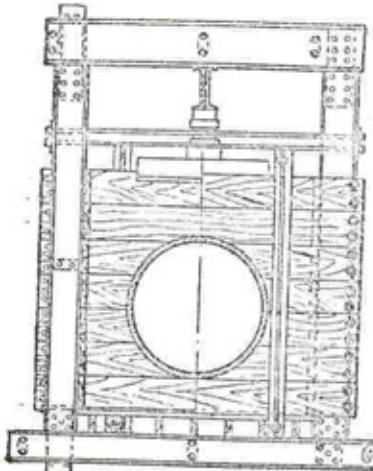
Обе трубы были взяты длиной 2,45 м.

Первоначально предполагалось в этом устройстве довести трубы до разрушения. Но оказалось, что трубы имеют несущую способность значительно более предположенной, и мощности устройства не хватило для разрушения образцов. Опыты пришлось прекратить после разрушения части обустройства. Но те усилия, которые были получены, значительно превысили давление от оси наиболее тяжелого паровоза того времени.

Во время процесса испытания, после каждого интервала дополнительной нагрузки, велись аккуратные замеры вертикального и горизонтального диаметров трубы в каждой волне. Эти данные и составляют основу опытов Fowler'a.

Трубы были составлены из двух половинок. Соединение сделано аналогично описанному выше — в виде крюкообразных скреп и выемок в гофрах.

Трубы были расположены на песчаной подушке толщиной в 30 см и, кроме того, обсыпаны песком с боков и сверху. Для создания условий, близких к работе железнодорожного полотна, сверху засыпки на расстоянии 56 см центр от центра были уложены три шпалы сечением $20,5 \times 20,5$ см и длиной 2,28 м. На этих шпалах располагались рельсы



Фиг. 60. Устройство, примененное Fowler'ом для опытов над гофрированными трубами в 1916 г.

близких к работе железнодорожного полотна, сверху засыпки на расстоянии 56 см центр от центра были уложены три шпалы сечением $20,5 \times 20,5$ см и длиной 2,28 м. На этих шпалах располагались рельсы

с расстоянием между ними в 1,43 м. Гидравлические домкраты передавали давление непосредственно на головки рельсов, как раз над центром средней шпалы.

Так как предварительные опыты показали, что под громадными давлениями, которые были получены в установке, шпалы вдавливались в песок, то засыпка в верхней части над трубой в дальнейшем была сделана из щебня, при этом толщина засыпки, как минимум, была принята равной диаметру трубы.

Над трубой $d = 0,61$ м засыпка состояла из слоя песка в 35 см и слоя щебня в 30 см;

над трубой $d = 0,92$ м слой песка составлял 66 см и слой щебня 30 см.

При испытании трубы $d = 0,61$ м максимальная нагрузка достигла 141 т. По достижении этой нагрузки шпалы сломались, а домкратные прокладки разрушились. Максимальная деформация трубы, замеренная при этом, составила только 2,85 см. После снятия нагрузки трубы подняла засыпку над ней с полотном и домкратными устройствами, причем остаточный прогиб составил 1,8 см.

Максимальная нагрузка для трубы $d = 0,92$ м составила 174 т. Наибольшая деформация была замерена в четырнадцатой волне (всей трубе было 36 волн) и составила 4,6 см. По удалении нагрузки под весом засыпки толщиной $\approx 0,9$ м и домкратной установки остаточная деформация составила 3,4 см. Среднее по длине укорочение вертикального диаметра под максимальной нагрузкой составило 4 см, а средняя остаточная деформация составила 3 см.

Наибольшее давление на ось паровоза в США во времена производства опытов составляло 31,8 т. Если к этому прибавить, как это делал Fowler, 35% на динамическое действие нагрузки, то получим максимальное сосредоточенное давление с учетом динамического эффекта в 42,9 т.

Эта нагрузка довольно близка к первому, полученному в домкратной установке, усилию в обоих опытах — 42,5 т.

Максимальные и средние упругие деформации обеих труб под этой нагрузкой оказались следующие:

	Максимальная деформация	Средняя деформация
для трубы $d = 0,61$ м, калибр 14 . . .	1,2 см	0,8 см
для трубы $d = 0,92$ м, калибр 12 . . .	1,6 см	1,2 см

Остаточная деформация после прекращения давления оказалась равной втулю.

В результате опытов Fowler пришел к убеждению, что гофрированные трубы могут вполне безопасно выдержать существовавшую в то время любую нагрузку.

Опыты Talbot'a

В 1908 г. профессор Иллинойского университета Talbot, применяя устройство, аналогичное указанному выше, произвел испытание трубы $d = 0,92$ м, калибра 12 и длиной 2,45 м.

Под нагрузкой в 54,5 т Talbot пол. л полную среднюю деформацию трубы в 3,66 см, а под нагрузкой в 83,5 т такая же деформация составила 9,6 см.

Опыты Armco Culvert and Flume Manufacturers Association

В 1923 г. из Национальной железнодорожной выставке демонстрировался ящик такого же типа, как и в опыте Fowler'a. В этом ящике находилась гофрированная труба $d = 0,76$ м, калибра 12, длиной 4,25 м, которая подвергалась давлению в 54,4 т. Деформации трубы, с практической точки зрения, были весьма малы и не были зафиксированы.

Опыты Marston'a

Опыты Marston'a в частности касались вопроса о действительном вертикальном давлении на жесткие (чугунные, железобетонные) трубы. В лабораторных условиях Marston'ом было найдено, что действительное вертикальное давление в два раза превышает вес призмы над трубой за счет есадки боковых призм засыпки. Объяснение этого явления будет приведено ниже.

Лабораторные опыты США, проведенные в каркасных устройствах, имеют тот недостаток, что в этом случае трубы все же не находятся в условиях, достаточно близких к действительности, т. е. когда они находятся в насыпях.

В самом деле, жесткость стенок заполнения опытных каркасов несколько искажает условия работы боковых призм давлений грунта и увеличивает боковой отпор засыпки.

В результате зафиксированная сопротивляемость труб в этих опытах несколько преувеличена по сравнению с условиями нахождения труб в насыпях.

С этой точки зрения значительно большее значение имеют опыты, проводимые в полевых условиях.

В США обширные и весьма интересные опыты в таких условиях были поставлены Американской ассоциацией железнодорожных инженеров (AREA) в 1925 г.

Б. Полевые опыты AREA

Полевые опыты были поставлены на Центральной Иллинойской ж. д., на одной из новых линий в Южном Иллинойсе, в шести милях к востоку от Farina, на пересечении линии водотока, носящего название „Извилистой речки“. Насыпь в этом месте достигает высоты 10,5 м.

Задачей этих опытов было определение значений действительных наружных давлений на трубы разных типов в теле насыпей и сравнительное изучение работы чугунных, железобетонных и гофрированных труб.

Прежде чем организовать опыты в полевых условиях, AREA поставил три предварительных эксперимента.

Целью этих экспериментов было выявление ряда обстоятельств и усовершенствование выработанной методики, чтобы более вооруженным подготовленными подойти к постановке опытов в большом масштабе.

Предварительный опыт № 1

Целью предварительного опыта № 1 было сравнительное изучение прочности гофрированной и железобетонной труб.

Испытанию подверглись трубы:

- 1) гофрированная, фирмы Armco, $d = 0,61$ м, калибр 10, длина 2,4 м;
- 2) железобетонная $d = 0,61$ м при толщине 7,6 см и длине 2,7 м, типовая для шоссейных дорог штата Кентукки.

Для исключения влияния отпора боковых стенок устройств, описанных выше, эти трубы помещались в выкопанную яму и засыпались смесью песка и щебня с небольшим количеством гравия, просеянного через грохот с отверстиями 5 см. Во время производства опыта прошел дождь, что увеличило плотность грунта засыпки.

Распорная конструкция состояла из нижней и верхней частей, с балками по концам трубы. Между этими частями помещались труба и домкратное устройство. Нагрузка передавалась через чугунную плиту, расположенную над трубой на высоте 0,9 м. Плита размещалась центрально над трубой и имела размеры: длину — 2,28 м, ширину — 0,61 м, толщину — 12,7 см. Давление производилось двумя гидравлическими домкратами, мощностью в 100 т, работающими от одного общего масляного насоса. Домкраты располагались симметрично над плитой на расстоянии 1,29 м центр от центра. Давление нагрузки в этой установке по бокам от трубы воспринималось материалом обсыпки.

Результаты этих испытаний сведены в табл. 11 (гофрированная труба) и табл. 12 (железобетонная труба).

Таблица 11

Давление домкратов в т	Погонная нагрузка в т/м	Величина горизонтального диаметра в м	Величина вертикального диаметра в м	Деформации в мм	
				горизонтальная	вертикальная
0	0	0,61	0,596	—	—
50	20,6	0,623	0,586	13	10
60	24,7	0,623	0,574	13	22
0	0	0,620	0,583	10	13
90	37,1	0,651	0,539	41	57
0	0	0,642	0,549	32	47
100	41,2	0,661	0,536	51*	60*

Таким образом, гофрированная труба не разрушилась под нагрузкой в 100 т, в то время как железобетонная труба дала трещину под нагрузкой в 24 т и окончательно сломалась под нагрузкой в 70 т.

Эти результаты были получены при отсутствии значительных боковых отпоров, даваемых стенками испытательного ящика опытов Fowler'a и Talbot'a. Последний, испытывая в таком устройстве железобетонную трубу $d = 1,22$ м, обнаружил первую трещину в ней при нагрузках от 8,05 до 30,4 т/пог. м, а в чугунной трубе того же диаметра — от 26,8 до 90 т/пог. м.

* Деформация остается постоянной после действия нагрузки.

Таблица 12

Давление домкратов в т	Погонная нагрузка в т/м	Величина горизонтального диаметра в м	Величина вертикального диаметра в м	Деформации в м.м.		Примечание
				горизонтальная	вертикальная	
0	0	0,61	0,61	0	0	
24	8,75	0,61	0,61	0	0	В нижней части среднего сечения появились трещины шириной в 3 м.м., распространяющиеся на всю длину колена
40	14,50	0,613	0,60	3	10	Продольные трещины вверху и внизу, распространяющиеся на полную длину всех трех колен
55	20	0,616	0,591	6	19	Трещины достигают величины 6 м.м.
60	22	0,642	0,575	32	35	Средняя секция разделилась на 4 отдельные части и держится только арматурой
70	25,6	0,661	0,559	51	51	Нагрузка не увеличивается благодаря нарушенной сопротивляемости трубы

Среднее значение раздаливающего усилия для железобетонной трубы в опыте Talbot'a значительно выше, чем в эксперименте AREA. Это объясняется, конечно, влиянием отпора боковых стенок испытательного устройства, примененного Talbot'ом.

Предварительный опыт № 1 интересен тем, что он показал большое влияние на несущую способность испытываемых труб отпора боковых стенок устройств типа Fowler'a. Кроме того, данный опыт показал также сравнительную прочность железобетонной и гофрированной труб.

Предварительный опыт № 2

Задачей предварительного опыта № 2 было исследование вопроса о соотношениях горизонтальных и вертикальных давлений на трубу в реальных условиях.

Для измерения давления в нескольких желательных точках на окружности трубы необходимо было применить какой-то прибор. С этой целью в данном опыте был употреблен аппарат, изобретенный Гольдбеком и Смитом. Этот прибор применяется в Бюро общественных дорог и в последнее время получил распространение. Аппарат представляет собой так называемую месдозу. Принцип действия месдозы таков. На диафрагму прибора с наружной стороны действует давление грунта. С внутренней стороны эта нагрузка уравновешивается давлением воздуха. При превышении давления воздуха диафрагма незначительно перемещается в наружную сторону. При этом в замкнутой цепи прибора прерывается электрический ток, что фиксируется на циферблате аппарата, и в этот момент отмечается величина давления воздуха на диафрагму по

манометру. Прибор, помещенный где-то в глубине под землей, соединен с измерительными приборами приемной станции с помощью шланга и проводов. Единица измерения наружного давления на диафрагму была принята в фунтах на квадратный дюйм.

При постановке опыта были приняты меры для аккуратного отсыпания показаний месдозы и, кроме того, показания манометра ежедневно проверялись с помощью ртутного столба. Камеры перед постановкой на место были тщательно очищены и испытаны (протарированы) под действием водяного столба. Установка их на место была произведена весьма аккуратно.

Испытаны были следующие трубы:

- 1) железобетонная труба длиной 0,9 м с внутренним диаметром $d = 0,61$ м и толщиной стенки 7,5 см;
- 2) секция гофрированной трубы длиной 0,6 м, диаметром $d = 0,76$ м, калибра 12;
- 3) такая же гофрированная труба длиной 4,25 м.

Эти три трубы были уложены впритык друг к другу. Сначала была положена железобетонная труба, один торец которой был заложен тонкой деревянной стенкой высотой, равной диаметру трубы, а другой примыкал к меньшей секции гофрированной трубы. Между всеми тремя трубами был оставлен зазор в 3,8 см, и соплеления обеспечивались обертыванием этих мест тройным слоем строительной бумаги в виде полосы шириной в 80 см, а сверх этого еще двумя слоями муслина. Такое соплеление обеспечило свободное передвижение концов сопряженных секций труб и предохранило от засыпания земли во внутрь их.

Месдозы в бетонной трубе закладывались в пробитые в стенке отверстия. При этом отверстия были сделаны точно по размерам приборов так, чтобы они плотно входили в эти отверстия, с диафрагмами, располагающимися при этом вровень с наружной поверхностью стенки трубы. После установки месдозы цементировались и составляли как бы часть конструкции. В гофрированных трубах месдозы вставлялись в прорези их стенок между волнами. При этом диафрагмы камер были расположены точно заподлицо с вершиной гофра с наружной стороны трубы. Камеры были приболочены к чугунным вкладышам, закладываемым в гофры с внутренней стороны. Отверстия для месдоз были сделаны водонепроницаемыми помощью круговой расчеканки камеры.

Полученная таким образом составная труба с заделанными в ней месдозами была осторожно уложена в горизонтальное положение на естественную невзрыхленную поверхность грунта из песка и гравия. При этом были зафиксированы по очереди давления в камерах при таком ее положении.

Труба в дальнейшем была уложена на подсыпку из естественного грунта толщиной в 68 см (90% диаметра гофрированной трубы). Грунт насыпи, образцы которого были взяты, в среднем имел объемный вес $\gamma = 1,6$ т/м³. Составная труба была первоначально обсыпана до $\frac{3}{4}$ ее высоты. Грунт над трубой отсыпался рядами с наброской земли и утрамбовкой ее на каждые 0,3 м высоты катком весом около 0,82 т, движущимся поперек насыпи. Отчеты показаний месдоз брались с каждыми 30 см высоты засыпки над верхом трубы до 2,4 м. При этом

брались два отсчета — один отсчет без динамической нагрузки насыпи, а другой — с нагрузкой.

Дополнительная нагрузка представляла собой чугунную плиту площадью $60 \times 240 \text{ см}^2$, весом около $0,25 \text{ т}$, расположенную над железобетонной и меньшей гофрированной трубой. Над этой плитой сверху ставили каток.

Замеренные давления (в $\text{кг}/\text{дм}^2$) даются в табл. 13 (незагруженная насыпь) и табл. 14 (насыпь, загруженная плитой и катком).

Таблица 13

Высота насыпи в м	Номера камер										
	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	
Давление на камеры в $\text{кг}/\text{дм}^2$											
2,44	6,0	22,6	34,8	23,5	4,1	8,9	12,7	16,3	15,3	—	
2,13	5,5	19,0	31,3	17,4	3,2	7,4	10,2	13,4	13,1	7,6	
1,83	5,0	16,3	27,0	14,5	2,5	6,3	9,5	12,7	12,4	6,3	
1,52	3,8	12,7	22,3	10,5	2,2	4,8	8,5	11,1	10,2	4,7	
1,11	3,2	9,9	20,7	8,6	2,1	4,6	7,9	10,5	9,9	4,6	
0,93	2,5	9,9	17,4	7,9	2,2	4,5	7,6	8,9	9,2	3,0	
0,23	2,9	5,7	4,8	3,5	2,2	1,9	3,3	4,8	2,9	2,2	

Таблица 14

Высота насыпи в м	Номера камер										
	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	
Давление на камеры в $\text{кг}/\text{дм}^2$											
1,52	3,8	13,1	22,6	10,5	2,5	5,1	9,5	11,4	11,8	5,1	
1,11	3,5	10,5	20,7	8,9	2,9	4,8	8,6	11,1	10,5	4,8	
0,93	2,2	9,3	21,6	7,9	2,1	4,8	7,3	9,9	9,9	3,5	
0,23	2,1	7,6	21,0	4,1	1,9	2,2	4,1	4,5	5,7	1,9	

предшествующий, только здесь, кроме того, исследовались еще гофрированные трубы диаметром $d = 0,61$ и $0,92 \text{ м}$. Полученные результаты сравнивались с данными предварительного опыта № 2. Экспериментаторы не делали подробных записей результатов, полученных при испытании, и ограничились выводом, что предварительная проверка пригодности месдоз для опытов оказалась положительной.

Основной опыт AREA

Опыт произведен в реальных полевых условиях.

Испытывались трубы, данные о которых сведены в табл. 15.

Характеристика трубы

№ сооружения	Характеристика трубы	Полная высота насыпи в м	Высота насыпи над трубой в м
1	Гофрированная труба; $d = 1,07 \text{ м}$; калибр 12	2,7	1,8
2	Гофрированная труба; $d = 1,07 \text{ м}$; калибр 12	4,55	3,7
3	Железобетонная труба; $0,61 \times 0,68 \text{ м}$	10,5	9,8
4	Гофрированная труба; $d = 0,61 \text{ м}$; калибр 14	10,6	10,0
5	Гофрированная труба; $d = 1,07 \text{ м}$; калибр 12	10,9	10,2
6	Тяжелая чугунная труба; $d = 1,07 \text{ м}$	11,3	10,4
7	Гофрированная труба; $d = 1,07 \text{ м}$; калибр 12	11,8	10,6
8	Гофрированная труба; $d = 1,22 \text{ м}$; калибр 10	11,5	9,6

Таким образом, из 8 опытных труб 6 были гофрированные диаметром от $0,61$ до $1,22 \text{ м}$, уложенные под насыпями различных высот. Для испытания было применено 66 месдоз описанной выше конструкции. При установке и пользовании месдоз были приняты те же меры предосторожности, что и в предварительном опыте № 2.

Такое большое количество приборов позволило свести до минимума случайные погрешности и отклонения в отдельных точках вследствие возможности статистической обработки результатов.

При укладке опытных труб особое внимание, независимо от типа и диаметра их, было обращено на создание сходных условий работы. Это необходимо было сделать для возможности сравнения полученных результатов.

Первоначальная обсыпка на высоту $\frac{3}{4}$ диаметра труб с бермами по бокам минимум в 35 см производилась вручную. Ниже поверхности земли, под трубы, в заложенные рвы была утрамбована желтая глина. Грунт насыпен на высоту $2,4 \text{ м}$ от основания был полевой поверхностью землей. Средний объемный вес этого грунта был определен взвешиванием в $1,22 \text{ т}/\text{м}^3$. Этот грунт ввиду его пылеватости трудно было укладывать. Поэтому выше $2,4 \text{ м}$ была уложена желтая глина, легко укладываемая в насыпь граблями, которые при воле и уплотняли ее. Эта часть насыпи была значительно смочена дождями. Глина была так тверда, что образец для определения объемного веса насыпи удалось взять в виде большой глыбы. Средний объемный вес этой глины составил $1,6 \text{ т}/\text{м}^3$.

Для выяснения влияния смачивания на давление, действующее на трубы, время выпадения лождей и их интенсивность во время постройки были зафиксированы. При этом также делались замеры давлений в месдозах. Данные о выпавших дождях приведены в табл. 16.

Насыпь была отсыпана между 2/VI и 15/VII 1925 г. По договору отсыпка грунта производилась слоями по $0,6 \text{ м}$. После отсыпки такого слоя и его выравнивания производились записи давлений на месдозы и замерялись прогибы труб. Прогибы измерялись изнутри в трех местах специальным измерительным приспособлением.

Таблица 16

Дата выпадения дождя	6/VI	8/VI	13/VI	14/VI	17/VI	22/VI	23/VI	24/VI	28/VI	5/VII	7/VII	9/VII	20/VII	25/VII	27/VII
Интенсивность дождя в см.	0,25	0,25	2,1	0,5	7,6	1,3	3,8	2,5	2,5	1,0	1,0	1,5	0,5	2,5	2,8

В среднем насыпь не составляла совершенно однородного материала. Отсюда следовало ожидать, что могли иметь место случайные незакономерные отклонения в давлениях на отдельные точки испытываемых труб. Этим и можно объяснить некоторые несходства, полученные в отдельных показаниях. Но употребление большого количества месдоз позволило по средневзвешенным данным отбрасывать случайные, отклоняющиеся от нормы, результаты.

В опыте делались попытки выявить и изменения давления на трубы в связи с осадкой насыпи. Для этого замерялась осадка и одновременно по месдозам, расположенным в ключе труб, делались записи давлений.

Осадки труб, расположенных наиболее глубоко от полотна насыпи, в частности, на 10/VIII 1925 г. или спустя 25 дней после окончания отсыпки, составили:

№ сооружения	Осадки в см
5	3,5
6	8,8 (чугунная труба)
7	5,2
8	5,5

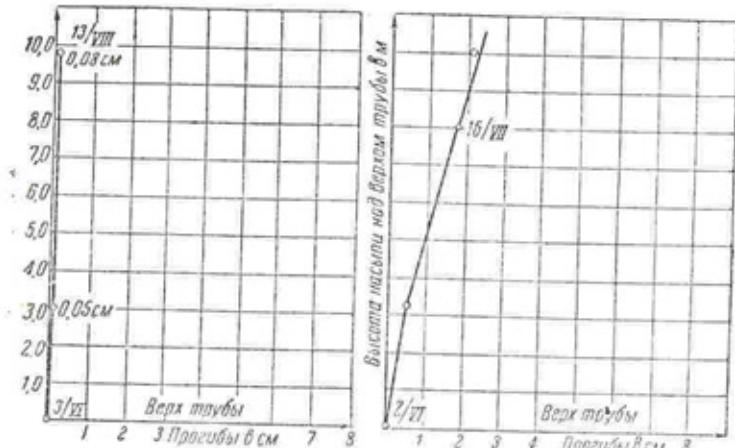
Из этих цифр видно, что осадка насыпи над чугунной трубой больше, чем над гофрированными трубами при одинаковой примерно высоте насыпи и величине диаметра труб.

Опыты, результаты которых приводятся ниже, проводились в течение 90 дней. Это было сделано для установления и фиксации изменений давлений на трубы во времени после отсыпки насыпи.

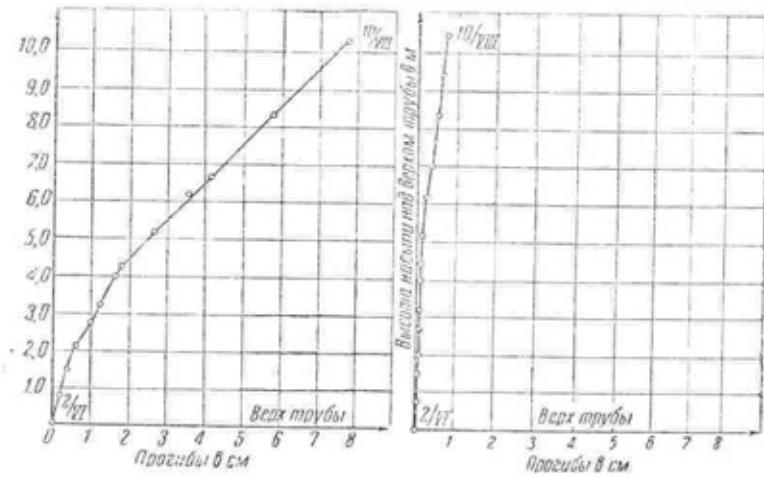
В результате описанных опытов были получены данные двух видов: прогибы, или деформации, вертикального диаметра труб и давления грунта на них в отдельных точках. Средние значения полученных величин, кроме сооружений № 1 и 2, приводятся ниже.

Прогибы. На фиг. 61, 62 и 63 представлены графики прогибов труб в сооружениях № 3, 4, 5, 6, 7 и 8. На первом из этих графиков приведены данные, относящиеся к железобетонной трубе $0,61 \times 0,68$ м и гофрированной диаметром $d = 0,61$ м, калибра 14. Железобетонная труба дала трещины прежде, чем насыпь была полностью отсыпана.

Гофрированная труба под полностью отсыпанной насыпью деформировалась на 2,05 см. Изменение деформации по мере отсыпки грунта можно принять здесь близким прямолинейному закону.

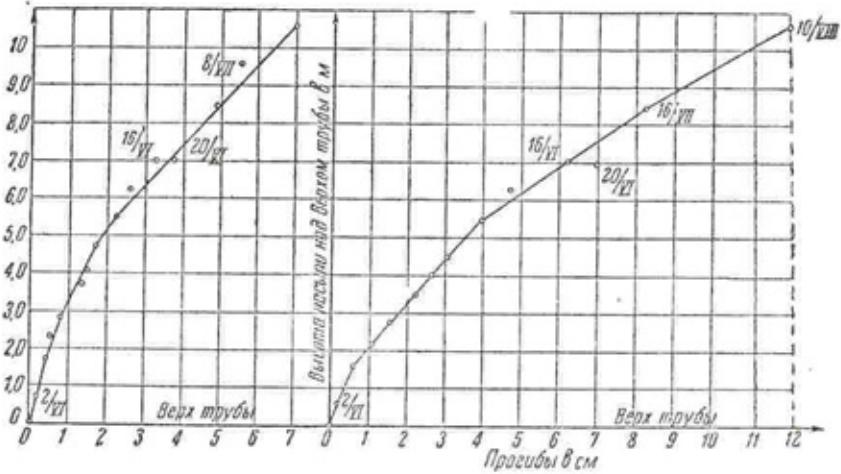
Сооружение № 3
Железобетонная труба $0,61 \times 0,68$ м.Сооружение № 4
Гофрированная труба $d = 0,61$ м,
калибр 14.

Фиг. 61. Графики прогибов сооружений № 3 и 4.

Сооружение № 5
Гофрированная труба $d = 1,07$ м,
калибр 12.Сооружение № 6
Чугунная труба $d = 1,07$ м
(толщина стенки $\delta = 3,8$ см).

Фиг. 62. Графики прогибов сооружений № 5 и 6.

Второй график дает возможность сравнить деформации между гофрированной и чугунной трубами одинакового диаметра $d = 1,07$ м. Максимальный прогиб гофрированной трубы калибра 12 (сооружение № 5) при высоте насыпи 10,5 м составил 7,7 см, а чугунной (сооружение № 6) — 0,7 см, при этом обе трубы никаких повреждений не получили.



Сооружение № 7
Гофрированная труба $d = 1,07$ м,
калибр 12.

Сооружение № 8
Гофрированная труба $d = 1,22$ м,
калибр 10.

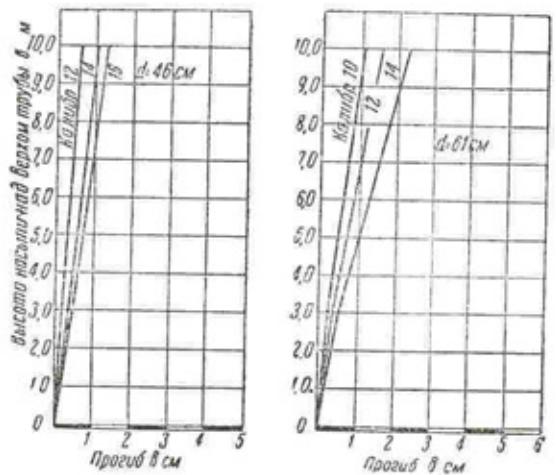
Фиг. 63. Графики прогибов сооружений № 7 и 8.

Прогиб гофрированной трубы в насыпях выше 4,5 м растет значительно быстрее, чем до этой высоты. Значения прогибов в функции высоты насыпи изменяются по параболическому закону.

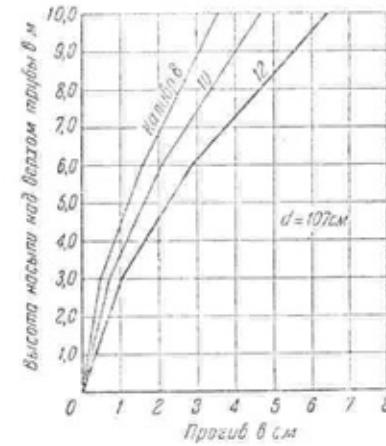
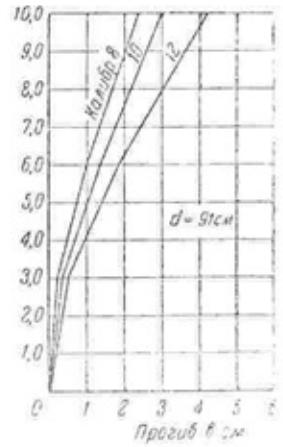
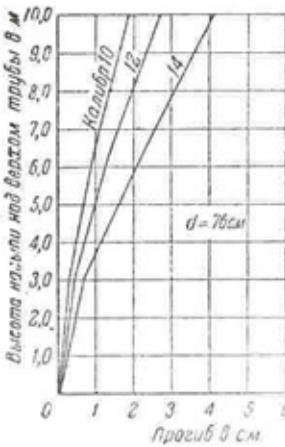
Третий график дает кривые деформаций двух гофрированных труб: $d = 1,07$ м, калибр 12 (сооружение № 7) и $d = 1,22$ м, калибр 10 (сооружение № 8). Обе кривые параболического вида. По окончании возведения насыпи прогиб первой трубы составил 7,0 см, а второй — 12,0 см. Обе трубы повреждены не были. Кривая прогибов первой трубы близко совпала с кривой деформаций гофрированной трубы сооружения № 5 таких же размеров, что подтверждает правильность полученных результатов.

На последних двух кривых (фиг. 63) обращают на себя внимание точки деформаций, взятых два раза в разное время (16/VII и 20/VII) при одной и той же высоте насыпи в 7 м, но первый раз до ливня (17/VII, интенсивность — 7,6 см, см. табл. 16), а второй раз после ливня. В первой трубе приращение деформации составило 5 мм, во второй — 7 мм.

Все испытанные трубы, кроме железобетонной, повреждений не получили. Поэтому сделать какие-либо выводы о пределе сопротивляемости гофрированной и чугунной труб в насыпях выше 10,5 м по данным этого опыта нельзя.



Фиг. 64. Прогиб гофрированных труб $d = 46$ и 61 см под нагрузкой насыпи.



Фиг. 65. Прогиб гофрированных труб $d = 76$, 91 и 107 см под нагрузкой насыпи.

На базе произведенных экспериментов необходимо в будущем поставить исследование о пределах безопасных прогибов и сопротивляемости гофрированных труб при различных условиях нагрузки насыпи.

На основе опыта у Farina, а также дополнительных лабораторных исследований и математических подсчетов были составлены графики кривых деформаций гофрированных труб в функции высоты насыпи в пределах до 10 м. При этом были взяты трубы диаметром от $d = 0,46$ м до $d = 1,22$ м (см. табл. 1) и калибров от 16 до 8. Эти графики приведены на фиг. 64, 65 и 66. Жирными линиями показаны кривые,

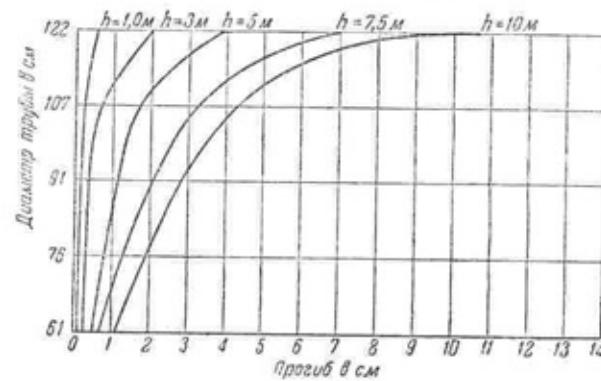
полученные на основании данных Farina *et al.*, светлыми — вычисленные из сопоставления опытов.

Для выяснения влияния диаметра трубы на прогиб при одной и той же насыпи и том же калибре построены два графика — фиг. 67 и 68.

Один из графиков дает систему кривых прогиба для насыпей высотой $h = 1; 3; 5; 7,5$ и 10 м труб диаметром d от $1,22$ до $0,61 \text{ м}$ при одном и том же калибре 10 . Другой график дает такие же кривые при тех же насыпях, но при калибре 12 в трубах диаметром от $0,46$ до $1,07 \text{ м}$. Рассмотрение этих графиков показывает, что трубы диаметром свыше $1,07 \text{ м}$ при высотах насыпи более 5 м имеют сильно увеличивающиеся прогибы.

Влияние изменения калибра на деформацию трубы представлено на фиг. 69 и 70.

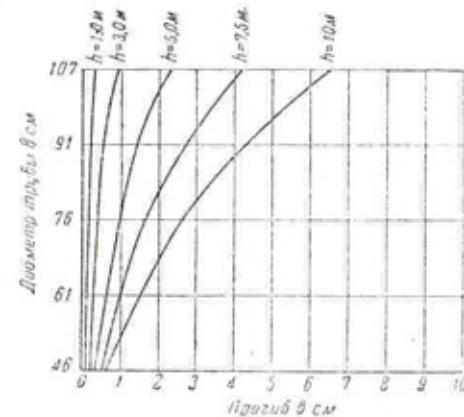
На первом графике дается система кривых изменений прогибов в трубе диаметром $d = 1,07 \text{ м}$ при различных высотах насыпей от 1 до 10 м в функции калибра. Эти кривые представляют собой почти прямые линии с изменяющимися в зависимости от высоты насыпей наклоном.



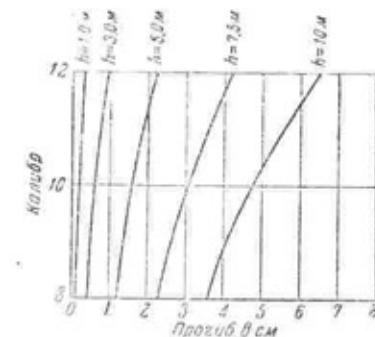
Фиг. 67. График влияния диаметра трубы на прогиб для калибра 10.

Чем больше насыпь, тем скорее увеличивается прогиб трубы при одном и том же изменении профиля железа. При высотах насыпей свыше $7,5 \text{ м}$ переход от калибра 12 к калибру 8 вызывает уменьшение деформации трубы почти вдвое.

На втс. 1 графике показана система кривых прогиба в трубе диаметром $d = 0,46 \text{ м}$ при тех же высотах насыпей в функции калибра между 12 и 16 . Эти кривые, как и в первом графике, также представ-



Фиг. 68. График влияния диаметра трубы на прогиб для калибра 12.



Фиг. 69. График влияния калибра трубы $d = 1,07 \text{ м}$ на ее прогиб.

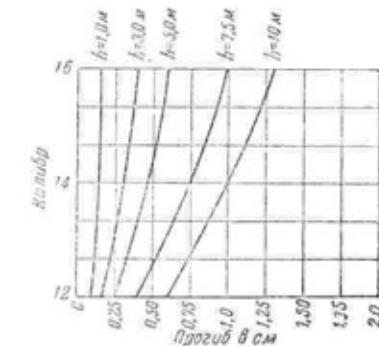
ляют собой почти прямые линии. Здесь изменение калибра в сторону более мощного особого эффекта в уменьшении абсолютной величины прогиба не вызывает, хотя относительное уменьшение деформации происходит примерно так же, как и в трубе $d = 1,07 \text{ м}$.

Таким образом, в трубах большего диаметра изменение калибра металла с увеличением насыпей играет большую роль, чем в трубе малого диаметра.

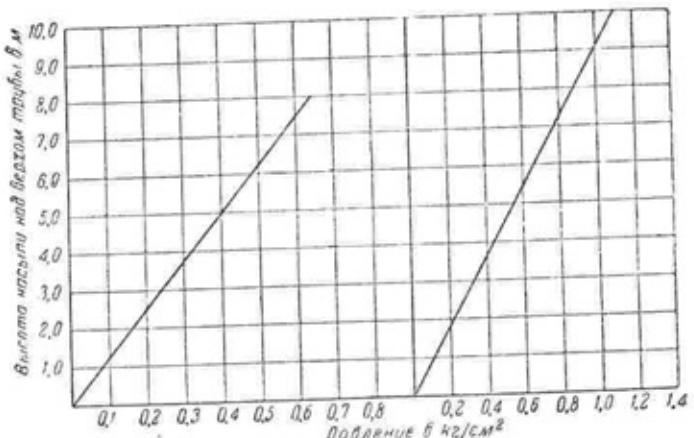
Давления на трубы. Результаты опыта, касающиеся давлений грунта на трубы, также сведены в систему графиков. На фиг. 71 приведены измеренные давления в гофрированной трубе (сооружение № 4 с диаметром $d = 0,61 \text{ м}$). В левой части диаграммы дается кривая изменения вертикального давления на трубу, а в правой — горизонтального. Как видно из графиков, зависимость выражается прямой линией.

Сравнивая графики, можно притти к выводу, что вертикальные и горизонтальные давления в этой трубе довольно близки друг к другу, и при высоте насыпи в 8 м первое составляет $0,63 \text{ кг}/\text{см}^2$, а второе — $0,84 \text{ кг}/\text{см}^2$, т. е. больше первого примерно на 33% .

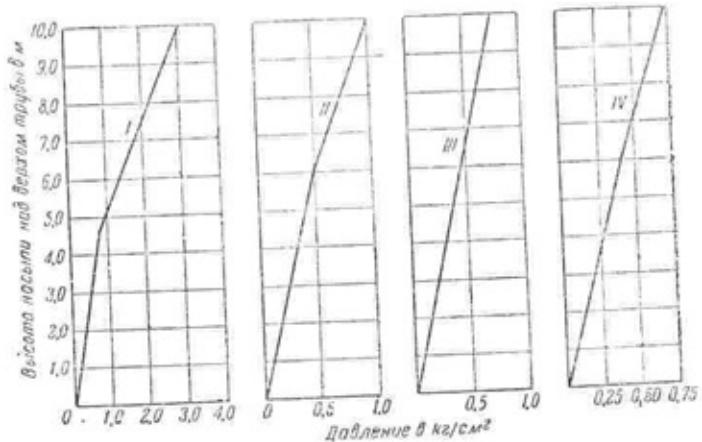
Отклонение линий средних значений от опытных точек для левого графика составляет в сторону уменьшения до $0,1 \text{ кг}/\text{см}^2$, а для правого графика отклонение в сторону уменьшения доходит до $0,35 \text{ кг}/\text{см}^2$, в сторону увеличения до $0,2 \text{ кг}/\text{см}^2$.



Фиг. 70. График влияния калибра трубы $d = 46 \text{ см}$ на ее прогиб.



Фиг. 71. Графики давлений грунта на гофрированную трубу $d = 0,61 \text{ м}$, калибр 14.



Фиг. 72. Графики давлений грунта на железобетонную и чугунную трубы.

На фиг. 72 дается такая же графическая интерпретация давлений (сооружение № 3) и чугунную (сооружение № 6) на железобетонную трубу. Кривая I представляет собой изменение вертикального давления для обеих труб в функции высоты насыпи. Для высоты в 10 м давление на трубу доходило до $3 \text{ кг}/\text{см}^2$. Отклонения отдельных точек от приведенной кривой достигают как в сторону уменьшения, так и в сторону увеличения, $0,4 \text{ кг}/\text{см}^2$. Особой разницы с этой точки зрения между железобетонной и чугунной трубами нет. Наибольшие отклонения дает чугунную трубу, опытные точки которой лежат на границе пучка железобетонной трубы, определенной кривыми изображающими изменения давления на кривых. Графики II и III изображают кривые изменения давления на чугунную трубу в радиальных сечениях под углом 30° и 60° к вертикали.

В первом случае наибольшее давление доходило при высоте насыпи в 10 м до $1 \text{ кг}/\text{см}^2$, а во втором случае — до $0,75 \text{ кг}/\text{см}^2$. Отклонения от среднего значения для первого случая составляли $0,2 \text{ кг}/\text{см}^2$, а во втором — $0,1 \text{ кг}/\text{см}^2$.

График IV дает кривую давлений для железобетонной и чугунной труб по горизонтали. Здесь максимальное значение давления составило $0,70 \text{ кг}/\text{см}^2$ с отклонением отдельных опытных точек от среднего значения в сторону уменьшения до $0,2 \text{ кг}/\text{см}^2$, а в сторону увеличения до $0,3 \text{ кг}/\text{см}^2$.

Распределение радиальных давлений по окружности чугунной трубы в одном квадранте для высоты насыпи $h = 9,5 \text{ м}$ приведено на фиг. 73.

Таким образом, для жестких (железобетонных и чугунных) труб боковые давления составляют примерно 30% вертикального.

Сравнивая между собой одинакового диаметра гофрированную и железобетонную трубы по приведенным графикам, приходим к выводам, что: 1) вертикальное давление из гофрированную трубу составляет около 40% вертикального давления на железобетонную и 2) горизонтальное давление из гофрированную трубу составляет около 150% такого же давления в железобетонной. При этом должно быть подчеркнуто свойство гофрированных труб работать примерно под равномерно распределенной нагрузкой давления грунта по всей окружности и свойство жестких труб воспринимать основное давление по вертикали.

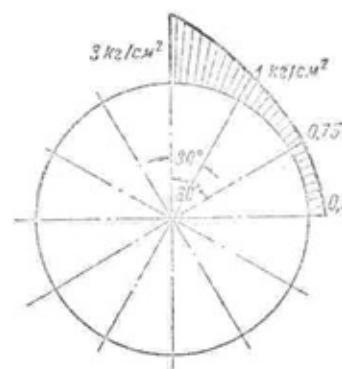
На фиг. 74 показаны графики средних замеренных давлений грунта на гофрированную трубу $d = 1,07 \text{ м}$, калибра 12 для вертикального (кривая I), радиального под углом 30° к вертикали (кривая II) и горизонтального (кривая III) направлений. Кривые I и III относятся к сооружениям № 5 и № 7, кривая II — к сооружению № 7. По этим кривым можно сделать примерно те же выводы относительно распределения давления по окружности трубы, что и в случае гофрированной трубы диаметром $d = 0,61 \text{ м}$.

Сравнение чугунной (фиг. 72) и гофрированной труб диаметром $d = 1,07 \text{ м}$ также повторяет уже полученные выше при анализе графиков фиг. 72 выводы. График сравнения радиальных давлений этих труб по окружности при высоте насыпи $h = 8 \text{ м}$ приведен на фиг. 75.

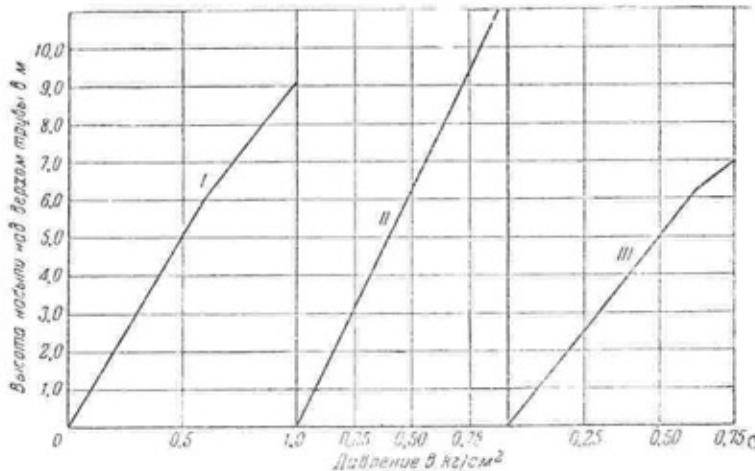
Пунктиром показана кривая давления для гофрированной трубы, сплошной жирной линией — кривая давления для чугунной трубы.

На графиках фиг. 76 даны кривые давлений наиболее подробно обследованной с этой точки зрения гофрированной трубы диаметром $d = 1,22 \text{ м}$, калибр 10 (сооружение № 8).

На фиг. 76 показаны: I — кривая вертикальных давлений; II — кривая радиальных давлений в сечении под углом 30° к вертикали; III — кривая радиальных давлений в сечении под углом 60° к вертикали.



Фиг. 73. График распределения внешних радиальных давлений по окружности чугунной трубы.



Фиг. 74. Графики давлений грунта на гофрированные трубы $d = 1,07 \text{ м}$, калибра 12 (сооружения № 5 и 7).

радиальных давлений в сечении под углом 60° к вертикали с отступлениями от средних значений во всех этих случаях до $0,1 \text{ кг}/\text{см}^2$; IV и V — кривые горизонтальных давлений (отступления для кривой IV — $0,1 \text{ кг}/\text{см}^2$, для кривой V — $0,2 \text{ кг}/\text{см}^2$).

Для горизонтального давления даны две кривые, так как из четырех опытных кривых три дают среднюю линию, значительно расходящуюся с четвертым геометрическим местом точек, для которого дается своя кривая (кривая IV построена по данным одной кривой; кривая V — по трем кривым).

Как видно из этих графиков, отношение давления по вертикали и горизонтали при высоте насыпи $h = 6 \text{ м}$ в горизонтальной трубе равно $0,83$ (для одного случая) и $0,36$ (для трех случаев).

Распределение давлений по окружности этой трубы для одного квадранта при высоте насыпи $h = 6 \text{ м}$ приведено на фиг. 77.

В результате суммирования данных опыта по давлениям грунта удалось построить график, приведенный на фиг. 78.

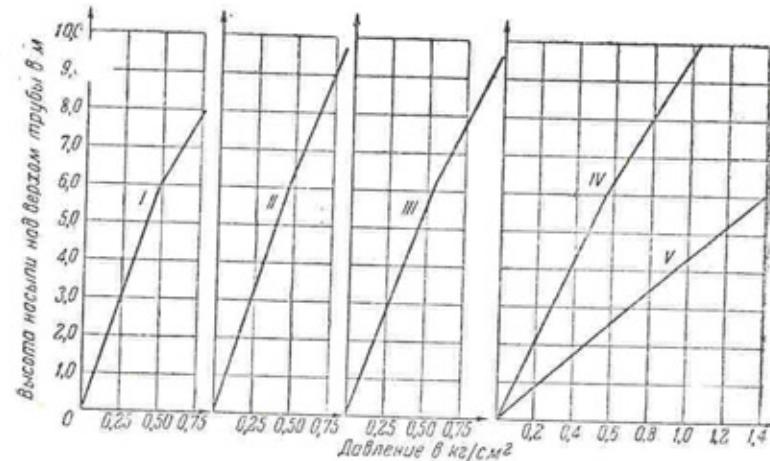
На этом графике даются приблизительные средние значения внешних давлений для жестких и гибких типов труб.

Для сравнения, кроме вертикальных и горизонтальных давлений грунта на испытанные трубы, дается также линия теоретического давления на уровне верха труб, равного весу столба насыпи. Эта линия построена с учетом указанного выше объемного веса грунта.

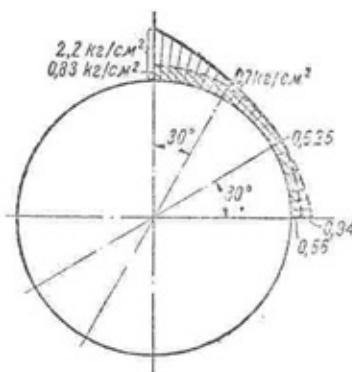
Анализируя график, отметим следующие положения.

испытанные трубы, дается также линия теоретического давления на уровне верха труб, равного весу столба насыпи. Эта линия построена с учетом указанного выше объемного веса грунта.

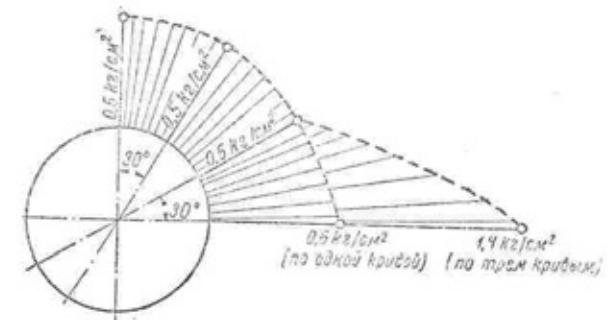
Анализируя график, отметим следующие положения.



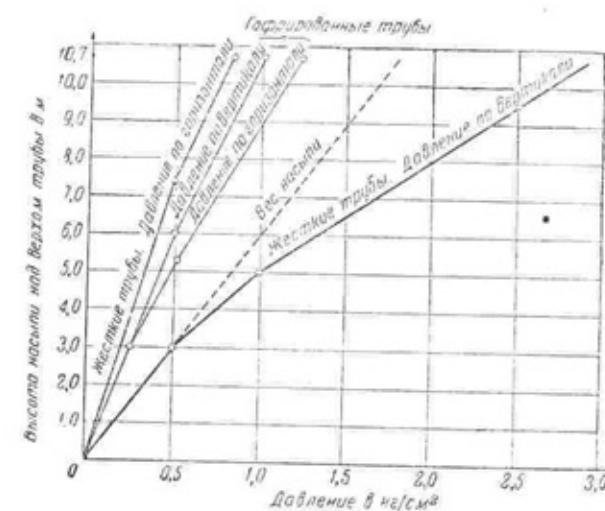
Фиг. 76. Графики давлений грунта на гофрированную трубу $d = 1,22 \text{ м}$.



Фиг. 75. График сравнения распределения внешних радиальных давлений по окружности чугунной и гофрированной труб $d = 1,07 \text{ м}$ ($h = 8 \text{ м}$).



Фиг. 77. График распределения внешних радиальных давлений грунта по окружности гофрированной трубы $d = 1,22 \text{ м}$.



Фиг. 78. Результативный график приблизительных средних значений давлений грунта на трубы по опытам AREA у Farina.

Горизонтальные и вертикальные давления на гофрированные трубы довольно близки друг к другу, тогда как в случае жестких труб для высоты насыпи $h = 10,5$ м горизонтальные давления составляют примерно 30% вертикальных. По сравнению с теоретической линией давления веса насыпи вертикальное давление в гибких (гофрированных) трубах всегда меньше его, в то время как для жестких труб это давление становится больше теоретического уже при высоте насыпи около 3,0 м.

При высоте насыпи в 10,5 м вертикальные давления на гофрированные трубы составляют около 50% теоретического, а на жесткие трубы около 150%. Или, другими словами, величина вертикального давления в гофрированных трубах составляет примерно $\frac{1}{3}$ такого же давления в жестких трубах. Величина давления по горизонтали в гофрированной трубе равна или несколько больше, чем по вертикали.

§ 12. Опыты автора

А. Целевая установка и методика опытов

Рассматривая результаты всех ранее проделанных в области исследования прочности опытов, можно заметить, что они дают или некоторое общее представление о сопротивляемости гофрированных труб в условиях, достаточно близких к действительным (опыты Петербургского металлического завода, опыты Fowler'a, Talbot'a и др.), или сравнительные данные о прочности жестких (железобетонных и чугунных) и гофрированных труб (опыты AREA).

По вопросу исследования внешних условий, действующих на трубы, в связи с особенностями устойчивости их формы, богатый и интересный материал дал такой обширный эксперимент, как опыты у Farina.

Что касается экспериментальных данных о временном сопротивлении гофрированных труб, то, насколько изм известно, опыт подобного рода, описанный выше, был проведен только Петербургским металлическим заводом в 1886 г. Этот опыт носил характер доводов упрощенного эксперимента без особого желания экспериментаторов выяснить это явление подробнее.

Точно так же до сего времени совершенно не ставились опыты определения внутреннего напряженного состояния труб под нагрузкой и выявления их общих деформаций по окружности. В последнем случае ограничивались определением деформаций вертикальных и горизонтальных диаметров.

Как указывалось выше, для ясного и правильного представления о поведении гофрированной трубы под нагрузкой необходимо знание как внешних, так и внутренних факторов, действующих на конструкцию и появляющихся в ней.

Данные о внешних усилиях и их распределении по окружности гофрированных труб достаточно полно освещены опытами Американской ассоциации железнодорожных инженеров.

Для представления явления в целом отсутствуют лишь экспериментальные данные о внутренних усилиях в трубах и об их распределении по окружности.

Для получения некоторых материалов в этом направлении автором был поставлен в 1930 г. ряд опытов над гофрированными трубами.

Опыты проводились в Бюро опытного строительства Научно-исследовательского института инженерных исследований НКПС. Производственная сторона дела (предоставление материалов, рабочей силы и секций испытываемых труб) была выполнена Можжелдорстром на территории одного из складов вблизи Савеловского вокзала в Москве.

Исследование было поставлено над трубами двух диаметров: $d = 0,76$ м и $d = 1,07$ м.

Эти трубы были получены из США для укладки на Турксиб, но уложены не были и в результате были направлены в Можжелдорстрой, который предоставил часть секций этих труб для описываемого опыта.

По требованиям технических условий в США на каждой гофрированной трубе должны быть указаны: фабричная марка завода-поставщика, основной металл и калибр железа.

На обеих трубах эти данные были зарегистрированы: фабричная марка — Armco; чистое железо было изготовлено прокатным заводом в Middletown (Ohio); труба диаметром $d = 0,76$ м была 14 калибра ($\delta = 2$ мм), а труба $d = 1,07$ м — калибра 12 ($\delta = 2,8$ мм). Трубы были оцинкованы. К секциям труб был приложен комплект соединительных креплений (см. фиг. 12). Сборка этих труб при испытании в насыпи производилась по способу, аналогично указанному на монтажной схеме (см. фиг. 4-3).

Для разрешения поставленных задач и в зависимости от изличных средств намечено было произвести опыты в следующих условиях:

- ✓ а) под вертикальной сосредоточенной нагрузкой при отсутствии бокового отпора;
- ✓ б) под нагрузкой в различных грунтах в специальном устройстве типа Fowler'a и Talbot'a и
- ✓ в) под нагрузкой в насыпи.

Во всех этих опытах производились замеры местных деформаций в отдельных точках трубы, фиксировавшиеся формой поперечного сечения ее, а также зазеркались горизонтальные и вертикальные диаметры.

Для определения местных деформаций применялись тензометры Гургенбергера со штангой длиной в 2 и 10 см. Приборы были установлены на трубах с помощью штифтов, продеваемых в специально прибличенные в соответствующих местах дупели.

Фиксация поперечно о сечении трубы производилась специальным, предложенным автором, прибором «фиксатором сечения». Этот прибор представляет собой планшет с тремя выдвижными ножками, в центре которого имеется неподвижная ось. На эту ось надета металлическая планка с прорезью, позволяющей стрелке совершать поступательные и вращательные движения на оси. Между осью и острьем стрелки имеется гнездо для карандаша. Обводя в установленном приборе острьем стрелки по внутренней окружности трубы, можно карандашом зачеркнуть в определенном масштабе форму ее поперечного сечения. Повторяя эти операции через определенные этапы нагрузки, можно получить систему наложенных друг на друга очертаний поперечного сечения трубы под соответствующими давлениями. По этим кривым можно определить в натуральную величину деформации трубы в любом диаметральном сечении. Для возможности приведения кривых к одной базисной точке расстояние центра прибора от острия нижней установочной ножки всегда

бралось постоянным. Установка прибора в требуемое место, после некоторой деформации трубы, осуществлялась передвижением верхних подвижных ножек. Центр прибора каждый раз устанавливался точно над серединой ширины острия нижней ножки по отвесу.

Замеры вертикальных и горизонтальных диаметров производились, как правило, при невозможности использования фиксатора вследствие больших деформаций, и выполнялись раздвижной микрометренною линейкой.

Для испытания труб с учетом бокового отпора применялось устройство, приведенное на фиг. 79. Оно представляет собой деревянный ящик, стены и пол которого выполнены из шпал и усилены снаружи брусьями жесткости. По середине высоты ящика устроен обжимающий стойки жесткости металлический корсет. Вверху и внизу ящика имеются две пары двутавровых балок распорного устройства, стянутых между собой 16 тяжами. Под верхней парой балок подвешена домкратная балка, на которую действует поршень домкрата и передает давление через распределяющие плиты на грунт засыпки. Для доступа во внутрь испытуемой трубы в двух стенах ящика были сделаны прямоугольные вырезы размерами примерно 80×80 см.

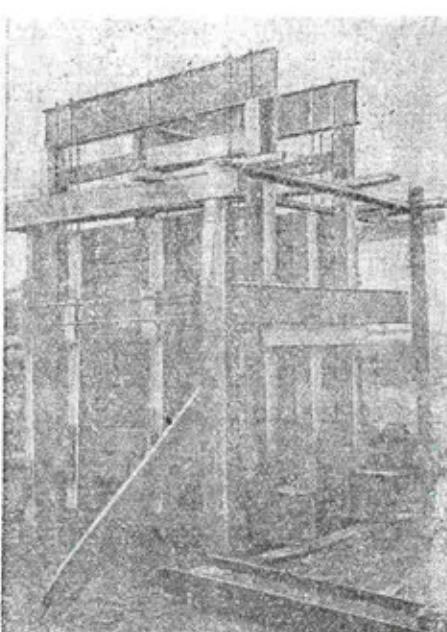
Общая методика опытов заключалась в регистрации по тензометрам и фиксатору напряженного состояния трубы для различных условий внешних воздействий под создаваемыми через определенные интервалы нагрузками.

Всего было проведено 10 опытов: из них 4 эксперимента под действием сосредоточенной нагрузки, 5 опытов в домкратном устройстве и один — в насыпи. Все эти опыты были проведены между 14/V и 11/VI 1930 г.¹

Б. Общие выводы из опытов автора

Суммируя опытный материал, зафиксируем его в ряде определенных положений. Все приводимые ниже чистовые значения различных величин и коэффициентов получены из опытов, не претендующих на исчерпывающую полноту, и поэтому должны рассматриваться как ориентировочные.

¹ Подробное описание опытов и вывод эмпирических формул, приводимых ниже, предлагаются к опубликованию отдельной работой в трудах Московского автомобильно-дорожного института.



Фиг. 79. Испытательное устройство для экспериментального изучения гофрированных труб.

стий под создаваемыми через определенные интервалы нагрузками.

Всего было проведено 10 опытов: из них 4 эксперимента под действием сосредоточенной нагрузки, 5 опытов в домкратном устройстве и один — в насыпи. Все эти опыты были проведены между 14/V и 11/VI 1930 г.¹

Сосредоточенная нагрузка. При опытных предварительных испытаниях гофрированных труб, например, с целью их приемки, можно предложить их опробование сосредоточенной нагрузкой, прилагаемой к секции трубы по всей длине через специальные наголовники с засыпкой. Эти наголовники по направлению диаметра трубы имеют размер около $0,4 d$. При этом трубы со швами типа фирмы Агисо, расположенным в горизонтальной плоскости, должны удовлетворять следующим условиям.

I. Критические усилия или разрушающие нагрузки определяются из формулы:

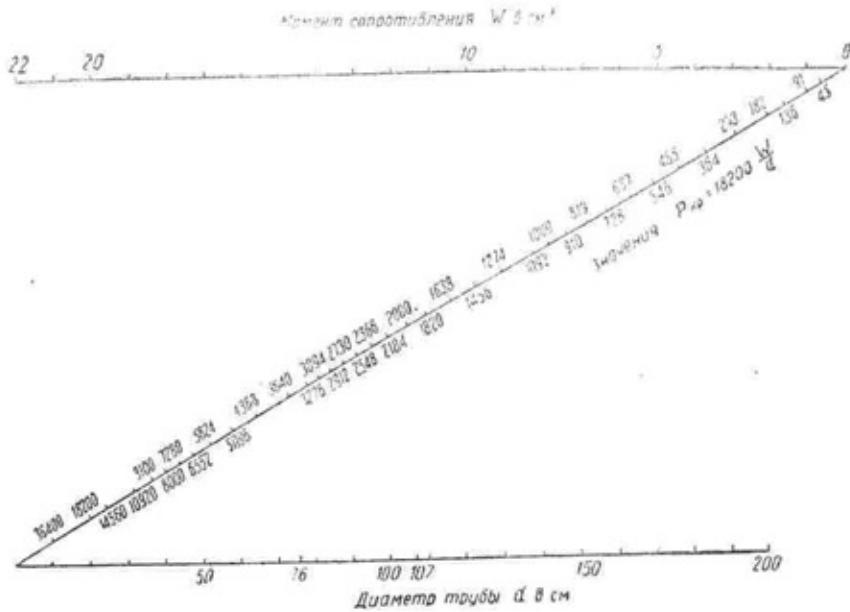
$$P_{kp} = \beta \frac{W}{d} \text{ кг.} \quad (1)$$

Здесь: d — диаметр трубы в см;

W — момент сопротивления сечения трубы в см³;

β — коэффициент пропорциональности.

Величина β , по данным опытов, может быть взята примерно равной 18 200. Критическое усилие P_{kp} может быть определено для различных



Фиг. 80. Номограмма значений критического усилия $P_{kp} = 18 200 \frac{W}{d}$.

значений d и W , в пределах употребляемых размеров, по зет-номограмме (фиг. 80). Промежуточные значения между цифрами, нанесенными на шкале номограммы, можно с достаточной степенью точности получить, если разделить интервалы между ними на равные части.

Пользование номограммой производится следующим образом. На нижней горизонтальной оси отыскивают величину данного диаметра

трубы. На верхней горизонтальной оси находят величину W для 1 пог. м трубы. Найденные на обеих осях точки соединяются прямой. Эта прямая на наклонной оси номограммы отсчитывает величину значения P_{kp} для 1 пог. м трубы.

Полное значение P_{kp} для всей длины загружения трубы находится после умножения найденной по номограмме величины на длину загружения.

III. Принимая коэффициент запаса разным приблизительно 4, можно определить допускаемые на трубы усилия по формуле:

$$P_{don} \cong 4500 \frac{W}{d} \text{ кг.} \quad (1')$$

III. Между разрушающими и допускаемыми усилиями и напряжениями n в ключе трубы во внутренних фибрах, удаленных от центра тяжести, существуют зависимости:

$$n = \beta_0 \frac{P_{kp} d}{W} \cong 0,16 \frac{P_{kp} d}{W} \quad (2)$$

и

$$n = \beta'_0 \frac{P_{don} d}{W} \cong 0,04 \frac{P_{don} d}{W}. \quad (2')$$

Здесь β_0 и β'_0 — коэффициенты пропорциональности.

IV. Точно так же между деформациями и критическим или разрушающим усилием существует зависимость следующего рода:

$$\Delta d = \Delta d_z = \Delta d_s = \gamma_1 \frac{P_{kp} d^3}{EJ} = \gamma \frac{P_{kp} d^3}{J} \cong \text{от } 0,05 \text{ до } 0,17 \frac{P_{kp} d^3}{EJ}. \quad (3)$$

Здесь: E — модуль упругости материала в $\text{кг}/\text{см}^2$;

J — момент инерции сечения трубы в см^4 ;

Δd_z и Δd_s — горизонтальная и вертикальная деформации трубы в см ;

γ и γ_1 — коэффициенты пропорциональности.

Для допускаемого усилия P_{don} имеем:

$$\Delta d = \Delta d_z = \Delta d_s = \gamma_1 \frac{P_{don} d^3}{EJ} = 0,655 \frac{P_{don} d^3}{EJ}. \quad (4)$$

V. Гофрированные трубы под сосредоточенной нагрузкой деформируются в виде восемерки, разделяясь при этом на 4 квадранта, из которых два вертикальных работают на положительный момент и сжатие, а два боковых на отрицательный момент и сжатие. Нуевые точки эпюры моментов лежат на равнобедренных прямых, проведенных к горизонтали под углом $\varphi = 43^\circ$ ($d = 1,07 \text{ м}$) — 36° ($d = 0,76 \text{ м}$), т. е. несколько меньше 45° .

Наибольшие напряжения в трубе возникают в горизонтальных и вертикальных сечениях.

Нагрузка с боковым отпором. При испытаниях гофрированных труб в специальных устройствах (ячиках) с повышенным по сравнению с насыпью боковым отпором, считая, что нагрузка целиком передается на

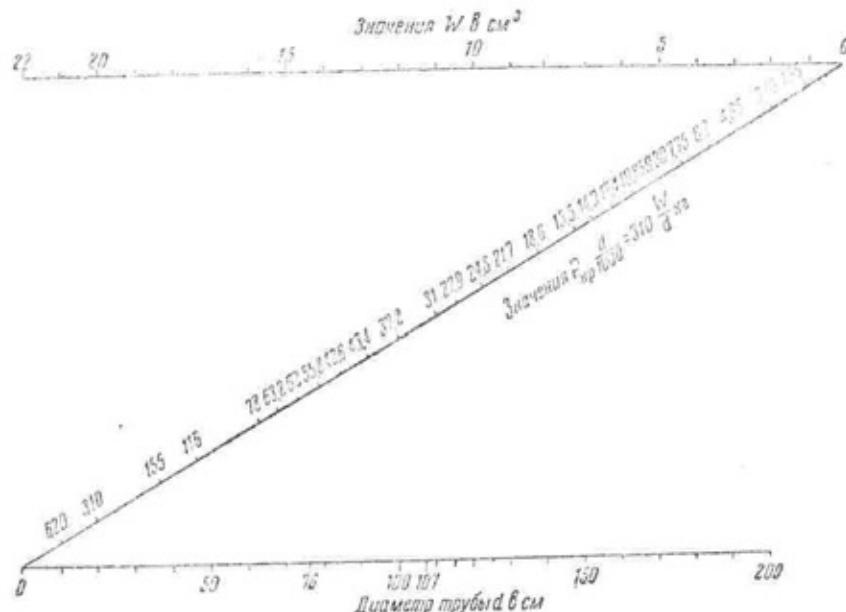
испытываемые трубы, без учета трения, можно установить следующие положения:

I. Критические усилия или усилия текучести зависят от расположения швовстыкования.

В случае более выгодного расположения швов в горизонтальной плоскости имеем:

$$P_{kp} = \eta \frac{W}{d^2} = 310000 \frac{W}{d^2} \text{ кг/см.} \quad (5)$$

Здесь: P_{kp} — погонное по диаметру трубы критическое усилие, определенное на горизонтальной плоскости, касательной к ключу трубы, и η — эмпирический коэффициент.



Фиг. 81. Номограмма значений критического усилия $P_{kp} = 310 \frac{W}{d^2}$.

Для расположения швов в вертикальной плоскости, кроме шлакового грунта, та же формула будет иметь следующий вид:

$$P'_{kp} = k \eta \frac{W}{d^2} = 240000 \frac{W}{d^2} \text{ кг/см,} \quad (5')$$

т. е. $k \cong 0,775$.

Для значения P_{kp} по формуле (5), умноженного на $\frac{d}{1000}$, на фиг. 81 построена номограмма в пределах для W от 0 до 22 см^3 на 1 м длины трубы и для d — от 0 до 2 м. На номограмме даны усилия текучести на 1 пог. м трубы в тоннах. Пользование номограммой такое же, как и

предыдущей. Полученная из nomogramma величина умножается на коэффициент $\frac{1000}{d}$.

Приведенные значения даны для глинистых и песчаных грунтов.

II. Допускаемые усилия для гофрированных труб в условиях засыпки в ящиках могут быть приняты равными, поскольку эти усилия являются вполне безопасными.

III. Зависимость между напряжением в ключе (внутренняя фибра уединенного от центра трения) трубы n_k и усилием текучести для горизонтального расположения швов выражается формулой:

$$(6) \quad n_k = \frac{P_{kp} d^2}{36 W}$$

Для вертикального расположения швов между напряжениями тех же фибр, по расположениям в горизонтальных (экваториальных) сечениях n_s и P_{kp} , имеем зависимость:

$$(6) \quad n_s = \frac{P_{kp} d^2}{128 W}$$

Уменьшение напряжения в последнем случае объясняется вычитанием из растягивающего напряжения изгиба напряжения скатия, тогда как для (6) происходит сложение этих напряжений.

IV. Зависимость между деформациями и усилием текучести при швахстыкования в горизонтальной плоскости выражается формулой:

$$(7) \quad \Delta d \cong 0,006 \frac{P_{kp} d^4}{E J}$$

V. Гофрированные трубы и при наличии бокового отпора деформируются в виде восьмерки, как и в случае сопротивленной нагрузки.

Наибольшие напряжения возникают в ключевых и экваториальных сечениях труб, причем в первых напряжения несколько больше, чем во вторых, что объясняется наличием пропорциональных швов.

Распределение напряжений по высоте волны происходит по закону, общему к случаю внеконцентрического скатия.

VI. Угол φ , определяющий положение нулевых точек эпюры моментов, меняется для срединного сечения под нагрузкой от 30 до 45°.

Для расположения швов стыкования в горизонтальной плоскости угол φ в среднем изменяется от 36° ($d = 0,76 \text{ м}$) до 42° ($d = 1,07 \text{ м}$), т. е. в таких же пределах, как и для сопротивленного действия нагрузки.

Таким образом, и здесь можно сделать тот же вывод, что с увеличением диаметра трубы угол φ также несколько растет.

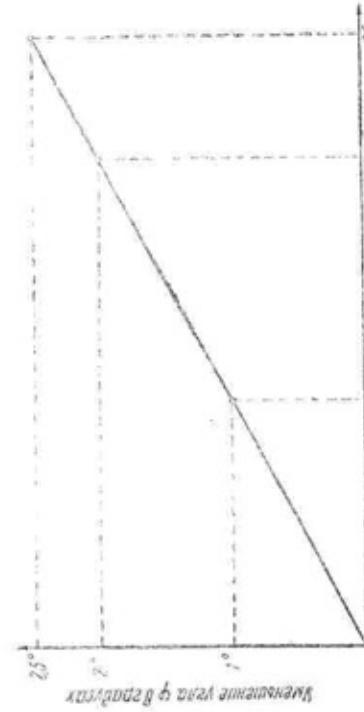
Поскольку для опытов со сопротивленной нагрузкой и нагрузкой с интенсивным боковым отпором (в условиях испытательного ящика) получились тождественные результаты, можно предполагать, что такая же картина имеется и для случая насыпи, так как условия работы трубы вней представляют нечто среднее между двумя исследованными видами нагрузки.

Значение угла φ с увеличением нагрузки, в пределах до усилия текучести, при швах в горизонтальной плоскости, очень незначительно уменьшается, примерно по закону прямой, тангенс угла наклона которой к абсолюте составляет $0,1 \text{ m}^{-1}$, независимо от диаметра трубы (фиг. 82), к VII. Деформации трубы при нагрузке с боковым отпором распределены по ее окружности в срединном (под нагрузкой) сечении, согласуясь с данными, полученными при сопротивленной нагрузке, и с эпюрами напряжений для нагрузки с боковым отпором.

Наибольшие деформации имеют место в ключевом и экваториальном сечениях.

При расположении швов по горизонтали можно принимать достаточно близко к действительности, что деформации пропорциональны нагрузке, т. е.:

$$(8) \quad \Delta d = \Delta d_0, \quad \Delta d_0 = k P,$$



Фиг. 82. Зависимость между ростом нагрузки и изменением угла φ .

Здесь k — тангенс угла наклона прямой, зависящий от диаметра и момента инерции сечения трубы, P — нагрузка на 1 m^2 в m и Δd — деформация в см.

По экспериментальным данным пропорбии примерно равны:
для трубы $d = 0,76 \text{ м}$; $\Delta d \cong 0,17 P$ в см;
для трубы $d = 1,07 \text{ м}$; $\Delta d \cong 0,68 P$ в см.

Для возможности построения кривых деформаций в функции нагрузки для различных диаметров трубы необходимо знать величину k . Эта величина для нагрузки P в m/m^2 приблизительно может быть определена из формулы:

$$(9) \quad k = 0,3 \times 10^{-7} \cdot \frac{d^4}{J}.$$

Кривые деформаций Δd для $d = 0,76$ и $1,07 \text{ м}$ даны на фиг. 83.

На этом же графике пунктирными линиями даны для сравнения экспериментальные кривые.
VIII. Овальность и расположение продольных швов стыкования могут значительно повлиять на работу трубы под нагрузкой.

Трубы необходимо укладывать со швами в горизонтальной плоскости. Для скорейшего создания бокового отпора трубам, кроме того, желательно придавать овальность, немного сплюснув их по горизонтали до зазадки в насыпь.

IX. Торцевые сечения трубы испытывают меньшие деформации, чем сретинные.

X. Глина и песок довольно близки друг к другу, как засыпка, с точки зрения их воздействия на работу трубы. Шлак, познаному, менее пригодный материал, так как он не обеспечивает такого же распределения нагрузки, как глина и песок.



Фиг. 83. Кривые деформаций в функции нагрузки.

Давление в насыпи. В виду малой нагрузки поставленные опыты в насыпи не дали существенных результатов.

Базируясь на полученных выводах при испытании в условиях сосредоточенной нагрузки и с интенсивным боковым отпором и считая, что работа гофрированных труб в насыпи представляет нечто среднее между этими видами воздействий, можно распространить ряд полученных выводов и на условия насыпи. Это тем более справедливо для тех случаев, когда для сосредоточенной нагрузки и для испытания в ящике получались тождественные результаты (величины углов φ).

Желательно в будущем развить поставленные опыты по этой же методике в условиях насыпи в более крупных масштабах.

Глава VI

РАСЧЕТНЫЕ ДАННЫЕ

Расчет труб, в том числе и гофрированных, требует умения определять внешние воздействия и знания законов внутренних усилий, развивающихся в результате действия внешних сил.

Эти два раздела расчета и являются предметом дальнейшего рассмотрения, причем первый раздел относится, собственно говоря, к теории давления сыпучих тел, а второй — к теории работы гибкого кольца.

Кроме того, интересно также осветить и историю вопроса, базируясь в основном на методах расчета, принятых у нас до 1914 г., чтобы показать эволюцию развития этого дела с течением времени.

§ 13. Методы расчета труб из гофрированного металла до 1914 г.

Анализируя и систематизируя расчетный материал о гофрированных трубах, можно установить следующие способы их расчета:

- 1) способ Фельдта,
- 2) способ Грыжевского,
- 3) способ Ковель-Владимирской ж. д. (расчет по Леви),
- 4) способ Ясевича,
- 5) способ Головина.

Наиболее примитивный из них — способ Фельдта: абсолютное решение задачи было дано Головицким.

В этих способах расчета не пытались решать проблему давления внешних сил на трубы, а задавались определенными предположениями в этом направлении.

*Способ Фельдта
(1899 г.)*

Способ расчета прочности гофрированных труб, предложенный Фельдтом, основывался на простой формуле напряженного состояния материала, находящегося под действием сжимающей силы и изгибающего момента:

$$\frac{N}{\sigma} + \frac{M}{W} \leq n_{\text{доп.}} \quad (10)$$

Допускаемое напряжение принималось $n_{\text{доп.}} = 1000 \text{ кг/см}^2$.

Подсчет сжимающей силы N и момента M производился по следующим формулам:

$$N = pr \quad \text{и} \quad M = \frac{pr^2}{2},$$

где: r — радиус трубы и

p — вертикальное погонное давление на горизонтальной плоскости, касательной к щелыке трубы.

Для удобства подсчетов при определении площади сечения σ и момента сопротивления W ширина расчетной полосы принималась равной длине волны гофрированного металла. При определении величины p давление оси паровоза (расчет производился для железнодорожных труб) считалось передающимся на одну только шпалу, а от нее — по закону распределения в сыпучем теле, принимая угол распределения давления через грунт для обоих главных направлений с половинным уклоном.

Кроме того, в давлении p учитывался вес столба грунта от верха насыпи до замка трубы на единицу площади, принимая объемный вес грунта $\gamma = 1,6 \text{ т}/\text{м}^3$.

Далее, инж. Фельдт считал, что полученные им указанным выше способом значения сжимающей силы и изгибающего момента, как для балки, должны быть уменьшены для расчета гофрированных труб в 8—10 раз.

Это заключение мотивировалось тем, что сводчатое гофрированное железо со стрелой подъема даже в $1/10$ I выдерживает, по опытным данным, нагрузку, в 8—10 раз большую, чем такое же балочное железо.

Расчет заклепок, скрепляющих две полуокружности трубы двумя горизонтальными швами, производился из поперечную силу без введения коэффициента уменьшения, принимаемого при определении прочности самой трубы.

Способ Грыжевского

Способ Грыжевского сходен с предыдущим и отличается от него только в некоторых вопросах, а именно — в определении действующей нагрузки и усилий и в величине допускаемого напряжения, а также применением графических методов расчета. В способе Грыжевского погонная нагрузка от давления паровоза также определяется на горизонтальной плоскости, касательной к замку трубы. Грыжевский подсчитывал величину нагрузки от давления всего паровоза, так как давление от одной оси получается меньшим ввиду накладывания зон распределения от каждой оси одной из другой, благодаря близкому расстоянию между ними. Сложение этих давлений Грыжевский производил графически, для чего им была построена сетка, представляющая насыпь в продольном разрезе. По верху насыпи были расположены оси паровоза с линиями распределения давления от каждой из них под углом 45° . Далее, насыпь была разделена по высоте рядом горизонтальных параллельных линий, представляющих касательные к щелю трубы при различных высотах засыпки над ней. В зависимости от высоты насыпи по этой сетке Грыжевский определяет давление в замке трубы в функции давления одной оси, умножая его на определенный коэффициент. Давление от одной оси определялось по закону распределения из-под шпалы, как это делал Фельдт.

Усилия в расчетной полосе трубы (обычно равной 1 м по длине ее), а также места максимальной напряженности определялись графически — рант трубы, условно принимаемый частью жесткого цилиндрического свода с симметричной нагрузкой. Деформации по горизонтальному диаметру во внимание не принимались. Для определения давления грунта расчетный квадрант трубы делился вертикальными полосками на ряд объемному весу $\gamma = 1.6 \text{ т/м}^3$.

К давлению грунта прибавлялись вычисленные, и для всех прочих призм принимаемые одинаковыми, давления от временной нагрузки. В результате получался ряд вертикальных сил, приложенных в центрах тяжести призм, принимаемых условно прямоугольными. Затем строились силовой и вереночный многоугольники и графически отыскалось место наибольшего эксцентричности с месту оси трубы и кривой давления с последующим определением из силового многоугольника нормальной силы N , соответствующей этой точке.

Проверка места с наибольшим эксцентричностью кривой давления производилась по той же формуле внецентренного сжатия:

$$n = \frac{N}{\omega} + \frac{M}{W} \leq n_{\text{доп}},$$

причем момент $M = Nc$.

Окончательно:

$$n = N \left(\frac{1}{\omega} + \frac{c}{W} \right) \leq n_{\text{доп}}. \quad (11)$$

Так как величины напряжений, полученные таким расчетом, значительно превышают допускаемые для металла, то расчетные напряжения сравниваются с величинами разрушающих напряжений в гофрированных трубах, подсчитанными по данным произведенных Петербургским заводом опытов. Значение временного сопротивления Грыжевский принимал $R = 8000 \text{ кг/см}^2$.

Несмотря на большую полноту по сравнению с первым способом расчета, данный метод имеет также весьма условный характер как в определении внешних воздействий, так и в определении напряжений, поскольку он не учитывает перемещения горизонтальных сечений трубы.

Таким образом, этот расчет далек от действительных условий работы трубы.

Расчет по Леви

(применен в 1905 г. Ковель-Владимирской ж. д.)

В способе расчета по Леви определение внешних воздействий производится, как и у Фельдта, на щелту трубы из-под одной шпалы со стоящей на ней осью паровоза. Плоскости распределения давления в грунте принимаются под половинным наклоном, а вес столба грунта вычисляется при $\gamma = 1.65 \text{ т/м}^3$. Это давление затем условно считается равномерно распределенным по всей поверхности трубы и нормальным к ней. В защиту такой гипотезы выдвигаются следующие положения: во-первых, наличие действия отпора на трубу в боковых призмах при надлежащем уложенном насыпи, а во-вторых, действие на боковые поверхности трубы давлений от соседних осей паровоза и плав по отношению к шпале и оси над замком трубы.

Кроме указанной гипотезы, в дальнейшем расчете предполагается, что труба не изменяет своей круглой формы и под нагрузкой, и поэтому расчет ведется как для тонкого, круглого колыца с прямоугольным радиальным сечением, без учета гофрированности.

Расчетная полоска принимается шириной, равной 1 мм.

Наибольшее напряжение осевого волокна выражается, по Леви, следующим образом:

$$n = \frac{qr}{\omega} \leq n_{\text{доп}}, \quad (12)$$

где: q — интенсивность равномерно распределенной нагрузки при ширине расчетной полоски в 1 мм;

ω — площадь сечения колыца полоски, в данном случае $\omega = \delta$;

r — радиус трубы.

Допускаемое напряжение было принят равным пределу упругости металла $p_{\text{дел}} = 1800 \text{ кг/см}^2$.

Расчет заклепок продольного шва производится на усилие, равное $S = ne$, где e — шаг заклепок.

Недостаток этого расчета заключается в условности определения внешних нагрузок, что имело место и в предыдущих расчетах, и в гипотетичности работы трубы, как колеса, только на осевые силы. В расчете по Леви гофрированность трубы не учитывалась, поэтому такие же результаты мы получили бы и для плоского металла такой же толщины.

Расчет по Ясевичу

(1901 г.)

В основу расчета Ясевича, как и предыдущего расчета, была положена гипотеза о равномерном распределении давлений на трубу со всех сторон.

Базируясь на этой гипотезе и используя опыты Фэрберна над трубами большого диаметра, раздавливаемыми водой, Ясевич пошел по пути получения эмпирической, отчасти умозрительной, формулы для расчета гофрированных труб.

Исходя из виде этой формулы является следующая эмпирическая формула Фэрберна, даваемая им на основе опытных данных:

$$p = 0,54 \frac{\delta^2}{dL}. \quad (13)$$

Здесь: p — разрушающее давление в $\text{кг}/\text{см}^2$, действующее на трубу;

δ — толщина стенки трубы в мм ;

d — диаметр трубы в мм ;

l — длина трубы в м .

Допускаемое давление Фэрберни предлагал принимать в 6 раз меньше разрушающего. Позднее (в 1859 г.) Грасгоф предложил для случая гибких листов в формулу (13) вместо l вставить значение \sqrt{l} . Основываясь на том обстоятельстве, что при небольшом изменении диаметра, по опытным данным, не требуется прибегать к увеличению сортимента, Ясевич пошел дальше и считал возможным в формулу Фэрберна вместо значения d ввести величину \sqrt{d} .

Ясевич также вместо толщины δ предложил в формулу (13) вставить момент сопротивления W , так как последний пропорционален толщине. Исходя из факта практического увеличения момента сопротивления трубы вдвое при таком же увеличении диаметра, величину W Ясевич также поставил под корнем.

В результате Ясевич предложил определять сопротивляемость гофрированных труб по формуле:

$$p = c \sqrt{\frac{W}{dl}}, \quad (14)$$

где c — некоторый эмпирический коэффициент.

Для этого коэффициента Ясевич предлагает брать величину 36 при условии, если p выражено в $\text{кг}/\text{см}^2$, W — момент сопротивления в см^3 для числа волн, укладываемых на длине в 20 см, а l и d выражены

в метрах. Тогда запас прочности, как и Фэрберни, равным 6 для допускаемого давления на горизонтальную плоскость в замке трубы, Ясевич имеет окончательную формулу:

$$p_1 = 6 \sqrt{\frac{W}{dl}}. \quad (14a)$$

Таким образом, данная формула не дает напряжения в самой трубе, которое должно быть сравнимо с допускаемым, как это делается обычно, а устанавливает допускаемое для данных размеров трубы давление насыпи на плоскость по замку трубы.

Таким образом, допускаемое давление из трубы p_1 должно быть больше или по крайней мере равно давлению, приходящемуся на нее, — p_2 .

Величину p_2 Ясевич подсчитывает аналогично, как это делает Грызевский, включая в нее давление паровоза и вес насыпи над замком трубы.

По данным Фэрберна, незначительные отступления от круглой формы трубы не влекут за собой больших изменений в ее сопротивлении.

Если форма трубы несколько отличается от круга, то можно для величины временного сопротивления давления изменять ту же формулу (13), но изменения величину d диаметром края изгиба в вершине малой оси, вычисленным по формуле $d = \frac{a^2}{b}$, где a — длина большой и b — малой осей эллипса.

Кроме того, Фэрберни для овальной трубы дает формулу разрушающего давления p в таком виде:

$$p = 0,936 \frac{(100 \delta)^{0.19}}{(a-b)bl}. \quad (15)$$

Здесь обозначения — прежние.

Возвращаясь к расчету Ясевича, следует отметить, что предложенная им формула является искусственно, фантико построенной, хотя по структуре своей и не противоречит сути дела. Тем не менее признать этот способ расчета исчерпывающим, конечно, нельзя.

Способ Головина

(1901 г.)

Наиболее обстоятельный расчет гофрированных труб был предложен Головиным и дается им в двух вариантах.

По I варианту необходимо знать или задаться отношением μ между горизонтальным q и вертикальным p давлениями на единицу площади.

По II варианту расчета необходимо знать величину удлинения горизонтального диаметра под нагрузкой.

В обоих вариантах из трубы вырезается квадрант, шириной равный длине волны, и рассматривается как гибкая арка с приложенными к ней в разрезах силами и моментами.

Величины внешних давлений принимаются пропорциональными высоте насыпи над данным элементом трубы и площадям соответствующих

проекций, так как считается, что каждый эл. лнт испытывает определенное горизонтальное и вертикальное давления.

К высоте насыпи прибавляется также приведенная высота временной нагрузки.

Расчет по I варианту. Усилия P (в пятовом сечении) и Q (в ключевом сечении) находятся из условия равновесия под действием распределенной вертикальной и горизонтальной нагрузок p и q . Если обозначить:

b — длина волны, или расчетная ширина, квадранта;

r — радиус трубы;

γ — объемный вес грунта;

a — отношение $\frac{h+h'}{r}$, где h — высота насыпи, а h' — приведенная высота временной нагрузки, то получим для P и Q следующие значения:

$$P = br^2\gamma \left(a + 1 - \frac{\pi}{4} \right), \quad (16)$$

$$Q = \mu br^2\gamma \left(a + \frac{1}{2} \right). \quad (17)$$

Здесь следует заметить, однако, что μ может изменять свою величину при деформации трубы.

Исходя из того обстоятельства, что крайние сечения квадранта, хотя и перемещаются, но без угловых деформаций, можно написать:

$$\int_0^s M_s ds = \int_0^{\pi/2} M_a dx = 0, \quad (18)$$

где M_s и M_a — моменты для какого-то сечения квадранта, в последнем случае для сечения, лежащего на оси под углом α к вертикали. Из приведенных соображений можно найти значение для моментов в пяте M_1 и в ключе M_0 :

$$M_1 = br^3\gamma \left[\left(1 - \mu \right) \left(\frac{a+1}{4} - \frac{2}{3\pi} \right) + \frac{2}{\pi} - \frac{\pi}{4} \right], \quad (19)$$

$$M_0 = br^3\gamma \left[\left(1 - \mu \right) \left(\frac{a}{4} + \frac{2}{3\pi} + \frac{1}{2} \right) - \frac{2}{\pi} + \frac{1}{2} \right]. \quad (20)$$

Значения напряжений определяются для ключевого и пятового сечений по формулам совместного действия сжимающей силы и изгибающего момента:

для ключа:

$$n = \frac{Q}{\omega} + \frac{M_0}{W} \leq n_{\text{дел}}$$

для пяты:

$$n = \frac{P}{\omega} + \frac{M_1}{W} \leq n_{\text{дел}}$$

Подсчеты, произведенные Головиным для напряжений, получаемых при значениях $\mu=1/3$ и $\mu=1$, показали, что для первого случая вели-

чины напряжений оказались значительно выше допускаемых, а для $\mu=1$ — в пределах допускаемых. Отсюда Головин делает вывод о большем значении бокового отпора, который увеличивает по мере деформации трубы значение коэффициента μ , приближая его к единице, и тем уменьшает величины напряжений в трубе.

Дляяснения этого вопроса Головин дает второй вариант расчета, вводя в рассмотрение величину отпора H .

Расчет по II варианту. К указанным в I варианте усилиям, действующим на расчетный квадрант, прибавляется величина отпора H боковых призм, появляющаяся вследствие деформации трубы под нагрузкой. Величина отпора мыслится, как две взаимно противоположные силы H , действующие на трубу по горизонтальному диаметральному сечению и представляющие как бы равнодействующие сил отпора, приложенные по поверхности трубы.

В этом случае для любой точки квадранта, расположенной на оси под углом α к вертикали, момент M_z выразится формулой:

$$M_z = M_1 + Hr \cos \alpha - br^2\gamma \beta. \quad (21)$$

Здесь β — некоторый числовой коэффициент, имеющий вид:

$$\beta = \frac{1}{2} \left[\frac{2}{3}(a+1) \cos^2 \alpha - \frac{2}{3} \cos^3 \alpha + a \sin \alpha + \cos \alpha - \frac{\pi}{2} \right]. \quad (22)$$

В этих формулах обозначения прежние.

Исходя из неизменности углов крайних сечений и определяя величину горизонтального перемещения пятового сечения квадранта через моменты, имеем:

$$\int_0^{\pi/2} M_s d\alpha = 0 \quad (18a)$$

$$\Delta d_z = \frac{r^2}{EJ} \int_0^{\pi/2} M_a \cos \alpha d\alpha. \quad (23)$$

Решая уравнения (18a) и (23), можно найти значение для M_1 и H , если обозначить через Δd_z горизонтальные перемещения нижней части квадранта:

$$M_1 = -(0,071a - 0,02) br^3\gamma + 4,279 \frac{EJ}{r^2} \Delta d_z, \quad (24)$$

$$H = (0,373a - 0,069) br^2\gamma - 6,721 \frac{EJ}{r^3} \Delta d_z. \quad (25)$$

Значения усилий P и Q остаются, как и в первом варианте, и даются в формулках (16) и (17), причем коэффициент μ в этом варианте Головин принимает равным 0,33.

Из формулы (21) при $\alpha=0$ находим эмпнт:

$$M_0 = (0,031 a - 0,014) br^3 \gamma + 2,442 \frac{EJ}{r^2} \Delta d_s \quad (26)$$

Полная нормальная сила в ключе Q_0 может быть найдена суммированием значений формул (17) и (25):

$$Q_0 = Q + H = (0,707 a + 0,098) br^2 \gamma - 6,721 \frac{EJ}{r^3} \Delta d_s \quad (27)$$

По этим значениям усилий находят напряжения включом и в пятом сечениях:

$$\sigma_0 = \frac{Q_0}{\omega} + \frac{M_0}{W} \leq \sigma_{\text{доп}}$$

$$\sigma = \frac{P}{\omega} + \frac{M_1}{W} \leq \sigma_{\text{доп}}.$$

Из рассмотрения формул (24), (26) и (27) видно, что с увеличением величины Δd_s значения момента M_0 увеличиваются, а нормальной силы Q_0 и момента M_1 уменьшаются. Но, поскольку в суммарном напряжении большее слагаемое получается от момента, то из законов изменения M следует, что напряжение включе с увеличением деформации горизонтального диаметра увеличивается, а в пяте — уменьшается.

Наиболее выгодная для трубы деформация Δd_s , будет такая, при которой $\sigma = \sigma_0$.

Недостатком этого довольно обстоятельного расчета является неопределенность величин μ и Δd_s , в результате чего способ Голевина и не нашел себе применения со временем его предложения (1901 г.) до 1914 г.

§ 14. Данные о внешнем давлении

Довольно обстоятельное исследование, посвященное анализу давлений на гофрированные трубы, находящиеся в насыпи, проделано Американской ассоциацией железнодорожных инженеров (American Railway Engineering Association — AREA)¹. В этом исследовании были использованы опытные данные эксперимента у Farina (см. § 11).

Общие данные. Вследствие большого количества различных факторов, влияющих на величину давления на трубу, определение его значения исключительно теоретическим путем не представляется возможным. Математическая теория вопроса должна быть основана на ряде эмпирических коэффициентов.

Так как в настоящее время значение ряда эмпирических коэффициентов неизвестно, то в разработанной теории эти коэффициенты определены теоретически приближенными способами.

Полученные теоретич сные результаты сравниваются с опытными данными, полученными у Farina.

Теория расчета. Все водопропускные трубы, находящиеся под давлением насыпи, могут быть разделены на два типа: жесткие (чугунные и железобетонные) и гибкие или эластичные (гофрированные конструкции).

В первом типе труб их прогиб и осадка в фундамент меньше, чем осадка призм, примыкающих к вертикальным плоскостям условного выреза трубы. Для гибких или гофрированных труб, наоборот, их деформация больше боковых усадок насыпи.

В результате, для первого случая, по плоскостям указанного выше выреза силы трения примыкающих призм грунта направлены вниз, что увеличивает основную нагрузку трубы. Для гофрированных же труб эти силы трения направлены вверх и тем самым уменьшают основную нагрузку гофрированной трубы.

Такова в общих чертах схема работы гофрированных и жестких труб в насыпи.

Перейдем теперь к самому расчету.

Примем следующие основные обозначения:

d — горизонтальный диаметр по наружному контуру трубы;

md — высота верха трубы над уровнем поверхности основания;

H — полная высота насыпи над щельгой трубы;

H_e — высота действия усадки, т. е. та высота насыпи над верхом трубы, в пределах которой происходит соответствующая усадка над трубой и по бокам от нее, в виду добавления некоторого равномерного слоя насыпи;

G — полная вертикальная нагрузка на единицу длины трубы от материалов насыпи;

V — полное вертикальное давление в призме насыпи непосредственно над трубой на единицу длины на некотором уровне;

γ — объемный вес материала насыпи;

f — коэффициент внутреннего трения материала насыпи ($f = \operatorname{tg} \varphi$);

μ — отношение бокового давления насыпи к вертикальному (величина, выраженная Ренкиним, в виде $\frac{1 - \sin \varphi}{1 + \sin \varphi}$);

e — основание натуральных логарифмов;

C_r — коэффициент нагрузки для жестких труб;

C_f — коэффициент нагрузки для гибких труб;

h — высота насыпи от ее верха до рассматриваемого слоя.

Рассмотрим сначала тип жестких труб (фиг. 84).

Случай, когда $H < H_e$:

$$dV = \gamma d dh + 2f\mu \frac{V}{d} dh \quad (28)$$

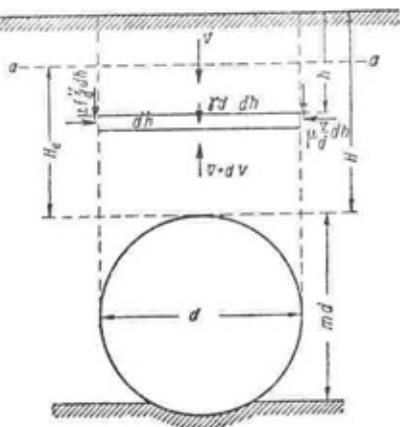
или

$$dh = \frac{dV}{\gamma d + 2f\mu \frac{V}{d}}. \quad (28a)$$

Решая дифференциальное уравнение, имеем:

$$\ln \left(\frac{2f\mu}{d} V \right) = \frac{2f\mu}{d} h + \text{const}, \quad (29)$$

6 Герног



Фиг. 84. Расчетная схема давления грунта на жесткую трубу.

¹ Бюллетень № 303 (часть 1) AREA, Vol. 29, январь 1928.

При $h=0$, $V=0$; отсюда

$$\ln \gamma d = \text{const}$$

Произведя гстановку, имеем:

$$\ln \frac{V_h}{(H-H_e)\gamma d} = \frac{2f\mu}{d} h, \quad (30')$$

$$\ln \left(\gamma d + \frac{2f\mu}{d} V \right) = \frac{2f\mu}{d} h + \ln \gamma d;$$

$$\ln \left[\gamma d + \frac{2f\mu}{d} \frac{V}{\gamma d} \right] = 2 \frac{f\mu}{d} h$$

или

$$\ln \frac{V_h}{(H-H_e)\gamma d} = \frac{2f\mu}{d} h, \quad (31)$$

отсюда

$$\ln \left[\frac{\gamma d + \frac{2f\mu}{d} V}{\gamma d} \right] = \frac{2f\mu}{d} h.$$

$$V_h = (H - H_e) \gamma d e^{\frac{2f\mu}{d} h}. \quad (35)$$

На щельте трубы $h = H_e$ и V_h — предстает дополнение до G от действия веса насыпи выше поверхности $a - a$.

Используя формулы (32) и (35) и заменив в первой из них H_e величиной H_e' имеем для полного вертикального давления на щельту формулу:

$$G = \left[\frac{\frac{2f\mu}{d} H_e - 1}{\frac{2f\mu}{d}} + \frac{H - H_e}{d} \frac{\frac{2f\mu}{d} H_e}{\frac{2f\mu}{d} H_e} \right] \gamma d^2, \quad (36)$$

$$G = C_r \gamma d^2,$$

$$C_r = \frac{\frac{2f\mu}{d} H_e}{2f\mu} - 1 + \frac{H - H_e}{d} \frac{\frac{2f\mu}{d} H_e}{\frac{2f\mu}{d} H_e}, \quad (33')$$

$$C_r = \frac{\frac{2f\mu}{d} H_e}{2f\mu} - 1 + \frac{H - H_e}{d} \frac{\frac{2f\mu}{d} H_e}{\frac{2f\mu}{d} H_e}, \quad (33'')$$

$$C_r = \frac{\frac{2f\mu}{d} H_e}{2f\mu} - 1 + \frac{H - H_e}{d} \frac{\frac{2f\mu}{d} H_e}{\frac{2f\mu}{d} H_e}, \quad (33''')$$

$$C_r = \frac{\frac{2f\mu}{d} H_e}{2f\mu} - 1 + \frac{H - H_e}{d} \frac{\frac{2f\mu}{d} H_e}{\frac{2f\mu}{d} H_e}, \quad (33''')$$

$$C_r = \frac{\frac{2f\mu}{d} H_e}{2f\mu} - 1 + \frac{H - H_e}{d} \frac{\frac{2f\mu}{d} H_e}{\frac{2f\mu}{d} H_e}, \quad (33''')$$

$$C_r = \frac{\frac{2f\mu}{d} H_e}{2f\mu} - 1 + \frac{H - H_e}{d} \frac{\frac{2f\mu}{d} H_e}{\frac{2f\mu}{d} H_e}, \quad (33''')$$

$$C_r = \frac{\frac{2f\mu}{d} H_e}{2f\mu} - 1 + \frac{H - H_e}{d} \frac{\frac{2f\mu}{d} H_e}{\frac{2f\mu}{d} H_e}, \quad (33''')$$

$$C_r = \frac{\frac{2f\mu}{d} H_e}{2f\mu} - 1 + \frac{H - H_e}{d} \frac{\frac{2f\mu}{d} H_e}{\frac{2f\mu}{d} H_e}, \quad (33''')$$

$$C_r = \frac{\frac{2f\mu}{d} H_e}{2f\mu} - 1 + \frac{H - H_e}{d} \frac{\frac{2f\mu}{d} H_e}{\frac{2f\mu}{d} H_e}, \quad (33''')$$

$$\delta_1 = \int_0^{H_e} \frac{V_h}{E} dh. \quad (38)$$

Здесь E — модуль упругости грунта.
Заменив величину V_h ее значением из формулы (35), имеем:

$$\delta_1 = \frac{(H - H_e)}{E} \int_0^{H_e} e^{\frac{2f\mu}{d} h} dh. \quad (39)$$

$$(29a)$$

или

$$(31)$$

или

$$(32)$$

или

$$(33)$$

или

$$(34)$$

где

$$(35)$$

или

$$(36)$$

или

$$(37)$$

или

$$(38)$$

или

$$(39)$$

или

$$(40)$$

или

$$(41)$$

или

$$(42)$$

или

$$(43)$$

или

$$(44)$$

Осадка в обеих боковых призмах равна δ_2 :

$$\delta_2 = \frac{(H - H_e) \gamma}{E} (H_e + md). \quad (40)$$

Приравнивая осадки, получим:

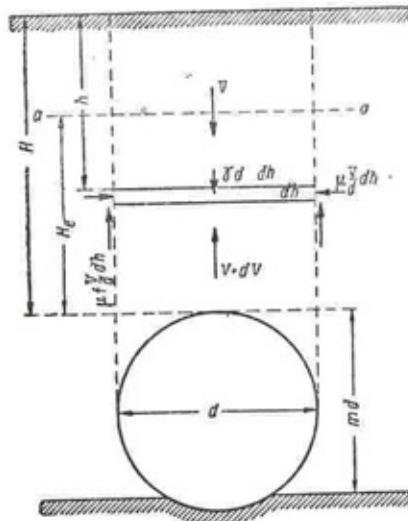
$$\delta_1 = \delta_2 = H_e + md = \int_0^{H_e} e^{\frac{2f\mu}{d} h} dh = \left| \frac{e^{\frac{2f\mu}{d} h}}{\frac{2f\mu}{d}} \right|_0^{H_e} = \frac{d}{2f\mu} (e^{\frac{2f\mu}{d} H_e} - 1). \quad (41)$$

Из формулы (41) найдем уравнение, по которому можно определять H_e :

$$e^{\frac{2f\mu}{d} H_e} - 2 \frac{f\mu}{d} H_e = 2f\mu m + 1. \quad (42)$$

В своих последующих работах D. A. Marston дает также формулы с учетом осадки и прогиба жесткой трубы¹.

Перейдем теперь к рассмотрению случая гибких, или гофрированных, труб.



Фиг. 85. Расчетная схема давления грунта на гибкую (гофрированную) трубу.

не сказывается, т. е. подтверждено

Так же, как и в жестких трубах, здесь могут быть два случая: $H < H_e$ и $H > H_e$.

Расчетная схема приводится на фиг. 85.

¹ Труды Highway Research Board, декабрь, 1925.

1 случай : $H < H_e$

$$dV = \gamma d dh - 2 \frac{f\mu}{d} \frac{V}{dh} dh, \quad (43)$$

или

$$dh = \frac{dV}{\gamma d - 2f\mu \frac{V}{d}}. \quad (43a)$$

После решения дифференциального уравнения получим:

$$\ln \left(\gamma d - \frac{2f\mu}{d} V \right) = - \frac{2f\mu}{d} h + \text{const} \quad (44)$$

при $h = 0$ и $V = 0$; отсюда

$$\ln \gamma d = \text{const}$$

и

$$\ln \left(\gamma d - \frac{2f\mu}{d} V \right) = \ln \gamma d - \frac{2f\mu}{d} h, \quad (44a)$$

или

$$\ln \left[\frac{\gamma d - \frac{2f\mu}{d} V}{\gamma d} \right] = - \frac{2f\mu}{d} h, \quad (45)$$

отсюда

$$\frac{\gamma d - \frac{2f\mu}{d} V}{\gamma d} = \frac{1}{e^{\frac{2f\mu}{d} h}}. \quad (46)$$

На горизонтальной поверхности, касательной к ключу трубы, $h = H$ и $V = G$.

Из формулы (46) для G получаем:

$$G = \frac{1 - \frac{1}{e^{\frac{2f\mu}{d} H}}}{2f\mu} \gamma d^2, \quad (47)$$

что можно написать в таком виде:

$$G = C_f \gamma d^2; \quad (48)$$

здесь

$$C_f = \frac{1 - \frac{1}{e^{\frac{2f\mu}{d} H}}}{2f\mu}. \quad (49)$$

Формула вида, аналогичного (47), дана также Marston'ом для расчета гофрированных труб, уложенных во рвах¹. Такой же вид имеет

¹ XXXI Бюллетень Испытательной станции Иловского государственного университета, стр. 33.

формула Janssen'a, данная им для определения давления в высоких ящиках, только в этой формуле силы трения учитываются приложенными по всему периметру ящика.

II случай: $H > H_e$. Применяя те же обозначения, что и для второго случая типа жестких труб, аналогично формулам (28—37), имеем:

$$dV_h = -2\mu f \frac{V_h}{d} dh, \quad (43')$$

или

$$\frac{dV_h}{V_h} = -\frac{2\mu f}{d} dh. \quad (43'')$$

Решив дифференциальное уравнение, найдем:

$$\ln \frac{V_h}{(H - H_e)\gamma d} = -\frac{2\mu f}{d} h, \quad (45')$$

или

$$V_h = \frac{(H - H_e)\gamma d}{e^{\frac{2\mu f}{d} h}}. \quad (50)$$

Для значения $h = H_e$ величина V_h представляет дополнение к G от веса материала насыпи выше поверхности $a - a$.

Отсюда найдем величину давления на ключ трубы:

$$G = \frac{\left(1 - \frac{1}{e^{\frac{2\mu f}{d} H_e}}\right) \gamma d^2}{2\mu f} + \frac{(H - H_e)\gamma d}{e^{\frac{2\mu f}{d} h}} \quad (51)$$

или

$$G = C_f \gamma d^2. \quad (52)$$

Здесь

$$C_f = \frac{1}{2\mu f} + \frac{H - H_e}{de^{\frac{2\mu f}{d} H_e}}. \quad (53)$$

Для нахождения величины G необходимо определить H_e . Эта последняя величина определяется аналогично тому, как это было сделано в случае жестких труб. Отличие здесь заключается только в том, что для случая гофрированных труб нельзя написать равенства деформации грунта над трубой и в боковых призмах, не учитывая прогиба трубы. В жестких трубах эта величина не столь велика, как в гофрированных, и ею можно было без особой погрешности пренебречь.

Вследствие введения в равенство осадок прогиба трубы теряется возможность исключения из равенства модуля упругости грунта E , что значительно уменьшает практическое применение этой формулы.

Обозначим: y — прогиб трубы при высоте насыпи H над ключом; y_1 — прогиб трубы от веса насыпи, расположенной выше поверхности $a - a$.

Приравни осадки вертикальной и боковой призм, получим, используя формулы (39), (40) и (41):

$$\frac{(H - H_e)\gamma}{E} (H_e + md) = \int_0^{H_e} \frac{V_h}{d} dh + y_1. \quad (54)$$

Опыты у Farina (см. § 11) показали, что прогиб гофрированных труб представляет собой показательную функцию высоты насыпи, причем показатель функции широко изменяется в зависимости от материала насыпи. Эти обстоятельства сильно усложняют формулу для нахождения H_e .

D. Marston на Чикагской конференции AREA (октябрь 1927 г.), докладывая о своем методе решения основных уравнений для определения H_e в гофрированных трубах с учетом их прогиба и осадки основания насыпи, обратил внимание присутствующих, что верхние части кривых прогибов труб в функции высоты насыпи, собственно говоря, представляют собой прямые линии, причем эти прямые участки начинаются от точки кривой, для которой величины давления в опытах указывали на достижение поверхности $a - a$, т. е. величины H_e от ключа трубы.

Отсюда можно принять, что для прогибов трубы при высоте насыпи H большие H_e имеет место такая формула:

$$y = (H - l) \operatorname{tg} \alpha; \quad (55)$$

здесь:

H — высота насыпи, для которой определяется прогиб трубы;

l — отрезок из вертикальной оси кривой прогиба, отсекаемый продолжением прямого участка ее;

α — угол между вертикальной осью и продолжением прямого участка кривой прогиба.

Отсюда для прогиба y_1 трубы от материала насыпи, расположенного выше поверхности $a - a$, отстоящей от ключа трубы на H_e , можно получить уравнение:

$$y_1 = (H - H_e) \operatorname{tg} \alpha. \quad (56)$$

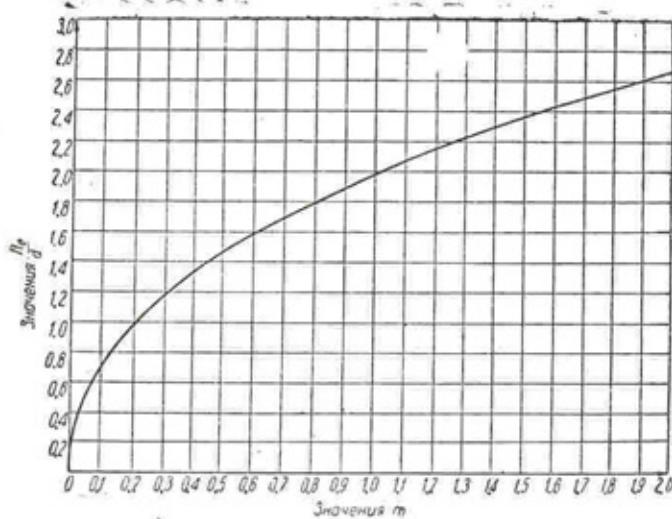
Подставляя полученное выражение для y_1 в формулу (54), заменив значение V_h по формуле (50) и произведя упрощение, получим:

$$H_e + md = \int_0^{H_e} \frac{dh}{e^{\frac{2\mu f}{d} h}} + \frac{E \operatorname{tg} \alpha}{\gamma}. \quad (57)$$

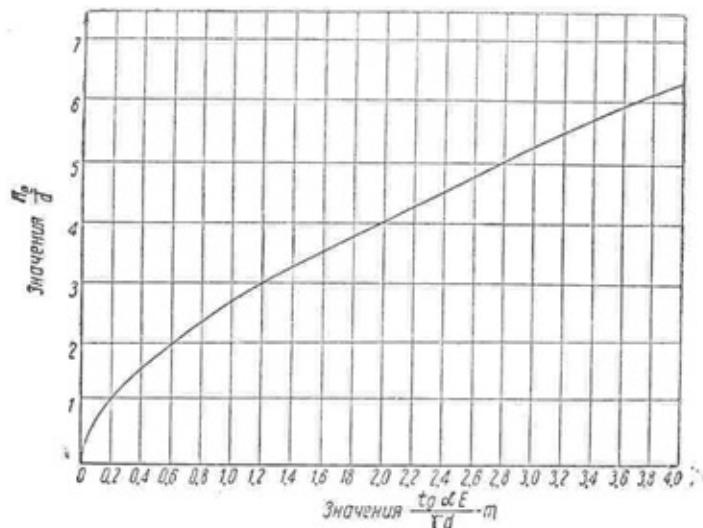
После интегрирования окончательно получим:

$$e^{-\frac{2\mu f}{d} H_e} + 2\mu f \frac{H_e}{d} = 1 + 2\mu f \left(\frac{\operatorname{tg} \alpha E}{\gamma d} - m \right). \quad (58)$$

Из этой довольно сложной формулы и определяется значение H_e . Наличие в ней величины прогиба трубы повлекло за собой появление модуля упругости материала насыпи E , не считая, кроме того, величины $\operatorname{tg} \alpha$.



Фиг. 86. График значений $\frac{H_e}{d}$ для жестких труб.



Фиг. 87. График значений $\frac{H_e}{d}$ для гофрированных труб.

На фиг. 86 дается график величины $\frac{H_e}{d}$, построенный для типа жестких труб по формуле (42) в функции величины m . В этом графике, как и во всех последующих, значения величины коэффициента трения грунта $f = \operatorname{tg} \varphi$ и значения отношения бокового давления грунта

к вертикаль. $\mu = \frac{1 - \sin \varphi}{1 + \sin \varphi}$ приняты для угла естественного откоса $\varphi = 27^{\circ}30'$. При этом $f = \operatorname{tg} \varphi = 0,52$; $\mu = 0,37$ и $2f\mu = 0,385$.

Определение значения H_e для гофрированных труб при $\varphi = 27,5^{\circ}$ можно производить по графику фиг. 87. Для этого необходимо знать величину $\left(\frac{\operatorname{tg} \alpha E}{\gamma d} - m \right)$, по значениям которой и берется по кривой

соответствующее значение $\frac{H_e}{d}$.

При другом угле внутреннего трения, который может меняться в пределах $22^{\circ} < \varphi < 40^{\circ}$, кривые графиков будут другие.

Таким образом, для определения величины H_e в гофрированных трубах необходимо знать величины $\operatorname{tg} \alpha$ и E .

Значения $\operatorname{tg} \alpha$ ассоциация (AREA) предлагает определять, пользуясь кривыми прогибов по опытам у Farina

Для определения модуля упругости грунта E , представляющего давление, приведенное к единице площади, деленное на относительную осадку или деформацию, требуется постановка специальных опытов. Практический пример определения E будет приведен ниже.

Ассоциации (AREA) предполагает в дальнейшем, после производства ряда опытов, заменить коэффициент $\frac{\operatorname{tg} \alpha}{\gamma d}$ эмпирическим. Этот эмпирический коэффициент должен также включить разницу в осадке фундамента под трубой и под прилегающей насыпью.

После определения из графиков (фиг. 86 и 87) значений $\frac{H_e}{d}$ требуется определить давления G на трубы.

Для этой цели служат графики фиг. 88 и фиг. 89.

На первом графике дается значение величины коэффициента нагрузки C_r для жестких, а на другом значение C_f для гофрированных труб. Эти величины — отвлеченные и вычисляются по формулам (34), (37), (49) и (53) и в обоих случаях определяются в функции известных отношений $\frac{H}{d}$ и $\frac{H_e}{d}$. Для последнего значения в функции $\frac{H}{d}$ построено

семейство кривых от $\frac{H_e}{d} = 0$ до $\frac{H_e}{d} = 6$ соответственно для жестких и гофрированных труб. Окончательно величины давлений G могут быть определены по формулам (33) и (48).

Проверка расчета по опытам у Farina

Жесткие трубы. Для сравнения взяты данные о трубе сооружения № 6 (см. табл. 15) опытных установок у Farina. Как сообщалось, это была чугунная труба диаметром $d = 1,07$ м при высоте насыпи над ней $H = 10,4$ м. Наружный диаметр $d_n = 1,13$ м; $m = 0,8$; $2f\mu = 0,385$. Объемный в с грунта $\gamma = 1,52$ т/м³.

Результаты подсчетов сведены в табл. 17.

Давление вертикальной призмы грунта на ключ трубы по расчету составляло при этом 15,9 т/м².

Таблица 17

Теоретические данные					Опытные данные $q' \text{ m}^2/\text{m}^2$	$\% \text{ расхо-}ждения$ $\frac{q - q'}{q'} \cdot 100$
$\frac{H_e}{d}$	$\frac{H}{d}$	C_r	$G \text{ m}/\text{m}$	Давление $q = \frac{G}{d_n} \text{ m}/\text{m}^2$		
1,8 (график фиг. 86)	9,25	17,57 (график фиг. 88)	34,0	30,0	22,4	+ 34

Для той же трубы, но при высоте насыпи $H = 4,47 \text{ м}$ и при $\gamma = 1,4 \text{ m}/\text{m}^3$, имеем данные, указанные в табл. 18.

Таблица 18

Теоретические данные					Опытные дан- ные включая по прибору Гольд- бека $q' \text{ m}^2/\text{m}^2$	$\% \text{ расхо-}ждения$
$\frac{H_e}{d}$	$\frac{H}{d}$	C_r	$G \text{ m}/\text{m}$	Давление $q = \frac{G}{d_n} \text{ m}/\text{m}^2$		
1,8	3,97	6,93 (график фиг. 83)	12,2	10,8	7,55	+ 43

Давление вертикальной призмы на ключ составляет $6,2 \text{ m}^2/\text{m}^2$.

Приведенные примеры показывают, что теоретические давления превышают действительные на 35—45%. В то же время действительные давления больше обычно подсчитываемых (вес столба грунта над трубой) на 18—30%.

Собственно говоря, и следовало ожидать, что вычисленные значения окажутся больше опытных, так как в приведенных формулах прогиб трубы приравнивался нулю. Если в приведенные вычисления ввести небо быстрый прогиб трубы, т. е. заменить коэффициент m величиной $\left(m - \frac{\operatorname{tg} \alpha_1 E}{\gamma d} \right)$, то вычисленные значения несколько уменьшатся.

Таким образом, и при настоящей стадии разработки данного расчета можно рекомендовать рассчитывать жесткие трубы, определяя давление в ключе по приведенным формулам.

Гофрированные трубы. Из опытных установок у Farina для сравнения с теоретическими данными взяты результаты, полученные на сооружениях № 5, 7 и 8 (табл. 15, см. стр. 53).

Для возможности получения теоретических результатов требовалось предварительное опытное определение модуля упругости грунта.

Это определение на грунтах насыпи у Farina было проделано Bureau of Public Roads.

Стандартное испытание для определения E заключалось в нахождении его величины по отдаче (упругой деформации), происходящей после удаления нагрузки.

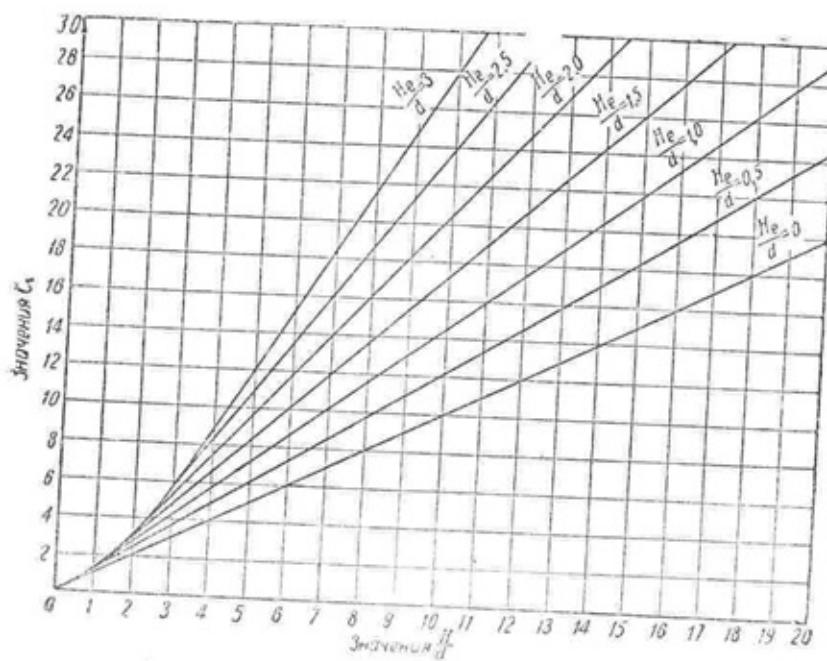
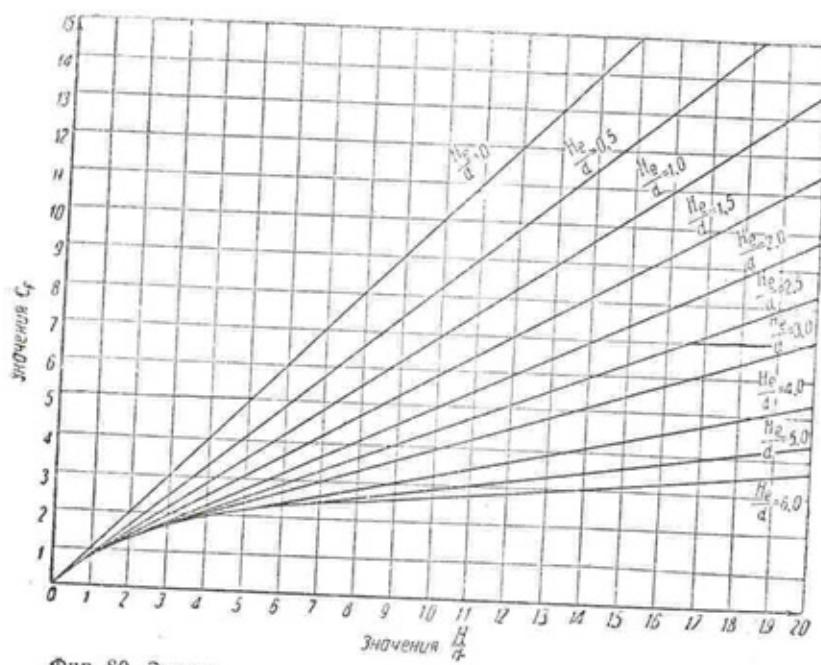
Фиг. 88. Значение величины C_f для жестких труб.Фиг. 89. Значение величин C_f для гибких (гофрированных) труб.

Таблица 19

Теоретические данные					Опытные данные $q' \text{ m}^2/\text{m}^2$	$\% \text{ расхо-}\text{ждения}$ $\frac{q - q'}{q'} \cdot 100$
$\frac{H_e}{d}$	$\frac{H}{d}$	C_f	$G \text{ m/m}$	Давление $q = \frac{G}{d} \text{ m}^2/\text{m}^2$		
1,76 (график фиг. 87)	8,95	4,97 (график фиг. 89)	9,8	8,6	8,25	+ 4

Таблица 20

Теоретические данные					Опытные данные $q' \text{ m}^2/\text{m}^2$	$\% \text{ расхо-}\text{ждения}$ $\frac{q - q'}{q'} \cdot 100$
$\frac{H_e}{d}$	$\frac{H}{d}$	C_f	$G \text{ m/m}$	Давление $q = \frac{G}{d} \text{ m}^2/\text{m}^2$		
1,44 (график фиг. 87)	4,30	2,78 (график фиг. 89)	4,66	4,23	5,65	- 24

Таблица 21

Теоретические данные					Опытные данные $q' \text{ m}^2/\text{m}^2$	$\% \text{ расхо-}\text{ждения}$ $\frac{q - q'}{q'} \cdot 100$
$\frac{H_e}{d}$	$\frac{H}{d}$	C_f	$G \text{ m/m}$	Давление $q = \frac{G}{d} \text{ m}^2/\text{m}^2$		
2,36 (график фиг. 87)	7,4	3,60 (график фиг. 89)	9,2	7,1	7,9	- 10

Отсюда

$$\frac{\operatorname{tg} \alpha E}{\gamma d} - m = \frac{0,009 \times 200}{1,42 \times 1,09} - 0,8 = 0,36.$$

Дальнейшие подсчеты приведены в табл. 20.

Давление от грунта на ключ в вертикальной призме — $6,65 \text{ m}^2/\text{m}^2$. Наконец, последнее сравнение сделаем для трубы диаметром $d = 1,22 \text{ м}$, уложенной в сооружении № 8 у Farina.Данные: $H = 9,6 \text{ м}$; $d = 1,30 \text{ м}$; $\operatorname{tg} \alpha = 0,0163$; $m = 0,8$; $\gamma = 1,52 \text{ m}^2/\text{m}^3$.

$$\frac{\operatorname{tg} \alpha E}{\gamma d} - m = \frac{0,0163 \times 200}{1,52 \times 1,30} - 0,8 = 0,85.$$

Подсчет q приведен в табл. 21.

Выявление модуля упругости производилось над цилиндрическим образцом диаметром 2,5 см и такой же высоты. Образец с боков был закреплен. Этот образец подвергали вертикальной нагрузке в 3 кг/см² в течение двух дней. Для определения упругой отдачи образец затем в течение двух дней оставлялся для пропитки водой без нагрузки.

По замеренной первой части опыта полной деформации и нагрузке были найдены модули упругости E_1 для материалов насыпей. Как сообщалось, в опыте у Farina насыпь состояла из двух грунтов. Для нижней части насыпи (первые 2,4 м) модуль упругости грунта $E_1 = 130 \text{ кг}/\text{см}^2$, для верхней части ее из глины $E_1 = 150 \text{ кг}/\text{см}^2$.

Во второй части опыта было установлено, что соотношение между упругой и полной деформациями составляет соответственно 0,126 и 0,177.

Отсюда величина E , т. е. отношение давления на единицу площади к относительному упругому перемещению, была найдена путем умножения значений E_1 на значение отношений упругих деформаций к полным.

В результате для E были получены величины в 16,4 и 26,6 кг/см². Так как грунт при испытании на определение E не был в естественных условиях, то полученные данные, повидимому, не совпадают с действительными величинами E , если бы их определить в насыпи. Они, по всей вероятности, будут ниже.

Других испытаний для определения E сделано не было, поэтому в дальнейшем применяются определенные выше величины.

Величина H_e над ключом труб распространяется в обоих грунтах, ввиду этого в дальнейших вычислениях пользуемся обеими модулями. Для некоторых труб большая часть H_e приходится на верхний слой насыпи, в других — в нижней части. Так как большая точность в данном примере себя не оправдывает, то в дальнейшем для всех труб бралось одно и то же значение, которое определялось как среднее из двух полученных для обоих грунтов насыпи. Таким образом, расчетное значение E было принято $E = \frac{1}{2} (16,4 + 26,6) = 21,5 \text{ кг}/\text{см}^2 \cong 20 \text{ кг}/\text{см}^2$.

За расчетный диаметр трубы принимался теоретический, увеличенный на величину горизонтальной деформации трубы. Эти деформации брались из данных испытания.

Сооружение № 5 — гофрированная труба диаметром $d = 1,07 \text{ м}$. Высота насыпи над верхом трубы $H = 10,2 \text{ м}$. Расчетный диаметр трубы $d = 1,14 \text{ м}$. Объемный вес грунта $\gamma = 1,52 \text{ m}^2/\text{m}^3$, $m = 0,65$.

По данным кривых прогибов $\operatorname{tg} \alpha = 0,0101$. Отсюда

$$\frac{\operatorname{tg} \alpha E}{\gamma d} - m = \frac{0,0101 \times 200}{1,52 \times 1,14} - 0,65 = 0,51.$$

Результаты подсчетов сведены в табл. 19.

Давление вертикальной призмы грунта на ключ трубы составляло при этом $15,5 \text{ m}^2/\text{m}^2$.

Для гофрированной трубы такого же диаметра, уложенной в сооружении № 7, результаты получились следующие (для неполной высоты насыпи): $H = 4,67 \text{ м}$; $d = 1,09 \text{ м}$; $\operatorname{tg} \alpha = 0,009$; $m = 0,8$; $\gamma = 1,42 \text{ m}^2/\text{m}^3$.

Вес вертикального столба грунта на клюс трубы — $14,7 \text{ t/m}^2$.

В теоретических подсчетах давления q не учитывались осадки трубы в фундамент и осадки фундамента под прилегающими боковыми призмами грунта. В распоряжении Ассоциации (AREA), хотя и были некоторые данные об осадке трубы в фундамент, но не было сведений об осадке фундамента под насыпью в боковых призмах. Разница между этими двумя осадками неизбежна, но она, по всей вероятности, не велика.

Несмотря на ряд предположений, которые были сделаны при определении теоретического давления q , его величина довольно близко подходит к опытным значениям. В трех приведенных сравнениях два случая дали почти тождественные результаты.

Давление q определилось как среднее делением G на d , фактически же давление из ключе, повидимому, несколько выше среднего. Учет этого обстоятельства сделает расчетные давления еще более близкими к опытным.

После проведения этой работы AREA поставила себе целью в последующем разрешить следующие вопросы.

1. Заменить величины m и $\left(\frac{\operatorname{tg} 2\varphi}{\gamma d} - m\right)$ эмпирическими, сохранив предложенные графики для определения $\frac{H_e}{d}$, C_f и C_r .

2. Вызвать неравномерность распределения давления на горизонтальную проекцию трубы.

3. Изучить вопрос о боковом давлении на стенки трубы.

Предложенный способ определения давления на гофрированные трубы, в соединении с данными опытов у Farlina, вполне может быть применен для практических целей даже в настоящей стадии его развития, имея в виду сравнимую близость полученных теоретических и опытных данных.

Что касается характеристик грунтов, которые для этого нужно знать (E , γ , φ), то в случае наличия соответствующих графиков для различных значений этих величин практически легко можно будет произвести расчет для любых заданных условий после лабораторных или полевых исследований грунтов.

§ 15. Теория расчета гибкого кольца

Выше было установлено, что определение внешних давлений на гофрированные трубы, по данным американских опытов и разработанной ими теории, является достаточно освоенным. Результаты этого расчета хорошо совпадают с данными опыта. Приведем теперь данные о работе самой трубы.

Полученные теоретические данные о внутренних условиях работы трубы в последующем сравниваются с результатами экспериментов автора. Предварительно рассмотрим существующие методы расчета кольца для последующего их сравнения и использования.

Расчет кольца на действие сосредоточенной силы¹. Пусть на кольцо постоянного поперечного сечения действуют две равные вертикальные взаимно противоположные силы сжатия P .

¹ С. П. Тимошенко. Курс сопротивления материалов. 1932, стр. 413.

Примем обозначения:

r — радиус осевой линии кольца;

ω — площадь поперечного сечения кольца;

S — статический момент поперечного сечения относительно центральной оси;

M и N — момент и нормальная сила в сечении под углом φ к горизонту

Благодаря симметрии нагрузки и исходя из неизменности напряжения поперечных сечений кольца в ключевых и экваториальных сечениях, можно утверждать, что угловые деформации в этих сечениях равны нулю.

Отсюда, беря частную производную выражения потенциальной энергии кольца по фиктивному моменту, приложенному в соответствующем сечении, и приравнивая этот момент нулю, имеем:

$$\Delta \varphi = \int_0^{\frac{\pi}{2}} \left(\frac{M}{ESr} + \frac{N}{E\omega r} \right) r d\varphi = 0. \quad (59)$$

Рассматривая один из квадрантов кольца с застопоренным вертикальным сечением и приложенными в экваториальном сечении силой $\frac{P}{2}$ и изгибющим моментом M_0 , можно для сечения под углом φ к горизонту написать следующие выражения момента и нормальной силы:

$$M = -M_0 + \frac{P}{2}r(1 - \cos \varphi) \quad \text{и} \quad N = \frac{P}{2} \sin \varphi$$

Подставив эти значения в уравнение (59) и проинтегрировав его, можем найти значение величины M_0 :

$$M_0 = \frac{Pr}{2} \left(1 - \frac{2}{\pi} \right) + \frac{PS}{\pi \omega}; \quad (60)$$

если вместо статического момента S поставить его значение $S = \omega z$, где z — расстояние от центра тяжести полусечения до центральной оси, то получим:

$$M_0 = \frac{Pr}{2} \left(1 - \frac{2}{\pi} + \frac{2z}{\pi r} \right). \quad (61)$$

Для гофрированных труб отношение $\frac{z}{r}$ весьма мало и им можно пренебречь; тогда окончательно для экваториального сечения величина изгибающего момента примет вид:

$$M_0 = \frac{Pr}{2} \left(1 - \frac{2}{\pi} \right) = 0,182 Pr. \quad (62)$$

Для ключевого сечения ($\varphi = \frac{\pi}{2}$) изгибающий момент:

$$M_1 = \frac{Pr}{2} - M_0 = 0,5 Pr - 0,182 Pr = 0,318 Pr. \quad (63)$$

Нормальная сила в этом сечении отсутствует, как обращается в нуль.

Отсюда проверка прочности кольца гофрированной трубы, находящейся под действием вертикальной сосредоточенной сжимающей силы, должна производиться по формулам:

в ключе:

$$n_k = \frac{M_1}{W} = \frac{0,318 Pr}{W}, \quad (64)$$

в экваториальном сечении:

$$n_3 = \frac{P}{2\omega} + \frac{0,182 Pr}{W}. \quad (65)$$

Деформации по вертикальному и горизонтальному диаметрам можно найти путем интегрирования уравнения оси кривого бруса. Это уравнение¹ имеет вид:

$$EJ \left(\frac{d^2y}{ds^2} + \frac{y}{r^2} \right) = -M; \quad (66)$$

подставив в уравнение (66) значение момента M с учетом знака для нашего случая и заменив ds величиной $rd\varphi$, получим:

$$\frac{d^2y}{ds^2} + y = \frac{Pr^3}{EJ} \left(\frac{1}{\pi} - \frac{\cos \varphi}{2} \right). \quad (67)$$

Здесь y — радиальное перемещение.

Интегрирование уравнения (67) дает:

$$y = -\frac{Pr^3}{EJ} \left(\frac{\cos \varphi}{4} + \frac{\varphi \sin \varphi}{4} - \frac{1}{\pi} \right). \quad (68)$$

Значения деформаций диаметров можно найти, придавая φ величину, равную 0 для экваториального сечения и $\frac{\pi}{2}$ для вертикального разреза, и удвоив значения y . Отсюда получим вертикальный прогиб трубы:

$$\Delta d_s = -2y_{\varphi=0} = 2 \frac{Pr^3}{EJ} \left(\frac{\pi}{8} - \frac{1}{\pi} \right) = 0,149 \frac{Pr^3}{EJ}, \quad (69)$$

а также и горизонтальную деформацию:

$$\Delta d_t = 2y_{\varphi=\frac{\pi}{2}} = -2 \frac{Pr^3}{EJ} \left(\frac{1}{4} - \frac{1}{\pi} \right) = 0,136 \frac{Pr^3}{EJ}. \quad (70)$$

Как видно из предыдущего, в ключе сжимаемой трубы момент положителен (искривление при деформации обращено выпуклостью вниз), а в горизонтальном сечении — отрицателен. Найдем точку ($\varphi = \varphi_0$), где момент равен нулю и где искривление оси меняет свой знак:

$$M = \frac{Pr}{2} (1 - \cos \varphi) - M_0 = 0$$

¹ С. П. Тимошенко. Курс сопротивления материалов. 1932, стр. 275.

или

$$1 - \cos \varphi = \frac{2M_0}{Pr} = \frac{2 \times 0,182 Pr}{Pr} = 0,364, \\ \varphi_0 = 50^\circ 30'. \quad (71)$$

Пример. Определить напряжения n_k и n_3 и деформации Δd_s и Δd_t в сечении гофрированной трубы (опыт под сосредоточенной нагрузкой, § 12) длиной $l = 0,65$ м при внутреннем диаметре $d = 1,07$ м, толщине металла $\delta = 2,8$ мм, высоте волны $h = 13$ мм и длине ее $\lambda = 70$ мм. Сосредоточенная нагрузка $P = 260$ кг.

$$\text{Радиус осевой линии } r = \frac{107}{2} + 0,65 = 54,15 \text{ см.}$$

$$\text{Число волн по длине трубы } k = \frac{65}{7} = 9,29.$$

Момент сопротивления одной волны $W_1 = 0,71 \text{ см}^3$, площадь сечения одной волны $\omega_1 = 2,13 \text{ см}^2$; момент инерции одной волны $J_1 = 0,462 \text{ см}^4$.

Отсюда: $W = kW_1 = 6,6 \text{ см}^3$; $\omega = k\omega_1 = 19,8 \text{ см}^2$; $J = kJ_1 = 4,3 \text{ см}^4$.

Модуль упругости металла $E = 2,1 \times 10^6 \text{ кг/см}^2$.

Находим требуемые величины:

$$n_k = \frac{0,318 Pr}{W} = \frac{0,318 \times 260 \times 54,15}{6,6} = \frac{4480}{6,6} \approx 680 \text{ кг/см}^2,$$

$$n_3 = \frac{P}{2\omega} + \frac{0,182 Pr}{W} = \frac{260}{2 \times 19,8} + \frac{0,182 \times 260 \times 54,15}{6,6} = 6,5 + 3,9 \approx 395 \text{ кг/см}^2,$$

$$\Delta d_s = 0,149 \frac{Pr^3}{EJ} = 0,149 \frac{260 \times 54,15^3}{2,1 \times 10^6 \times 4,3} = 0,149 \times 4,6 = 0,68 \text{ см},$$

$$\Delta d_t = 0,136 \frac{Pr^3}{EJ} = 0,136 \times 4,6 = 0,62 \text{ см.}$$

Расчет кольца на действие силовой распределенной нагрузки. С достаточной степенью точности можно принять, что вертикальные давления p на любой элемент трубы, находящийся в волнах, достаточно близки между собой по величине. То же самое можно принять и для бокового давления q . Высказавое предположение тем более близко к действительности, чем выше насечка.

Соотношение между горизонтальной и вертикальной нагрузками выражим коэффициентом $\mu = \frac{q}{p}$.

Труба, как и в предыдущем случае, загружена симметрично — все квадранты находятся в одинаковых условиях. Поэтому, рассматривая один из квадрантов трубы, можно опять применить уравнение углового перемещения для ключевого сечения, приравняв его нулю:

$$\Delta \varphi = \int_0^{\frac{\pi}{2}} \left(\frac{M}{ESr} + \frac{N}{E\omega r} \right) r d\varphi = 0.$$

Для данного случая, обозначив: M_1 и N_1 — момент и нормальную силу в экваториальном сечении, найдем момент в точке с квадранта, под углом φ к горизонту:

$$M = N_1 r (1 - \cos \varphi) - M_1 - \frac{pr^2 (1 - \cos \varphi)^2}{2} - \frac{\mu pr^2 \sin^2 \varphi}{2}. \quad (72)$$

Из условия равновесия вертикальных сил нормальная сила $N_1 = pr$.

Подставив в формулу (72) значение N_1 , приняв во внимание, что нормальная сила в точке с квадрантом определяется из уравнения

$$N = pr \cos \varphi - pr(1 - \cos \varphi) \cos \varphi + \mu pr \sin^2 \varphi, \quad (73)$$

значение M_1 можно найти после решения уравнения (59):

$$M_1 = \left[(\mu - 1) \frac{z}{2r} + \frac{1}{4}(1 - \mu) \right] pr^2. \quad (74)$$

Здесь z — расстояние от нейтральной оси до центра тяжести полусечения. В виду малости отношения $\frac{z}{r}$ можно первый член двучлена принять равным нулю, и тогда окончательно, с учетом знака:

$$M_1 = -0,25(1 - \mu)pr^2. \quad (75)$$

Зная M_1 , по уравнению (72) находим величину момента включевом сечении, которая будет равна:

$$M_2 = -M_1 = +0,25(1 - \mu)pr^2. \quad (76)$$

Нормальная сила включе, определяемая из условия равновесия горизонтальных сил рассматриваемого квадранта N_2 , равна: $N_2 = \mu pr$.

Отсюда напряжения в экваториальной n_1 и включевой точках n_2 будут равны:

$$n_1 = \frac{N_1}{\omega} + \frac{M_1}{W} = \frac{pr}{\omega} - \frac{0,25(1 - \mu)pr^2}{W} \quad (77)$$

$$n_2 = \frac{N_2}{\omega} + \frac{M_2}{W} = \frac{\mu pr}{\omega} + \frac{0,25(1 - \mu)pr^2}{W}. \quad (78)$$

Из условия равенства моментов включе и экваториальном сечении трубы можно установить, что место изменения знака момента (нулевая точка) расположено под углом $\varphi = 45^\circ$ к горизонту, независимо от изменения величины μ . Это легко также установить, приравняв нулю уравнение (72) после подстановки в него значения M_1 . Соотношение между напряжениями n_2 и n_1 можно выразить:

$$\frac{n_2}{n_1} = \frac{k\mu + 0,25(1 - \mu)r}{k + 0,25(1 - \mu)r}, \quad (79)$$

где $k = \frac{W}{\omega} = \frac{2\varphi^2}{h}$ есть величина, зависящая от радиуса инерции сечения и полной высоты волны, которой можно по малости пренебречь. Отсюда видно, что напряжения включе и в экваториальном сечении при любых μ могут быть приняты достаточно одинаковыми.

Из формул (77) и (78), пренебрегая значениями напряжений от продольной силы, можно определить значение величины μ :

$$\mu = 1 - \frac{4\pi W}{pr^2}. \quad (80)$$

В последней формуле $n = n_1 = n_2$.

Найдем теперь перемещения по вертикальному и горизонтальному диаметрам или деформации кольца. Для этого, применяя теорему Кастильяно, возьмем частные производные потенциальной энергии V по силам P_0 , приложенным соответственно включе или экваториальном сечении, которые в окончательном результате приравняем нулю.

В выражении потенциальной энергии работу нормальных и поперечных сил учитывать не будем. Тогда потенциальная энергия для всего кольца может быть написана в таком виде:

$$V = 4r \int_0^{\frac{\pi}{2}} \frac{M^2}{2ESr} d\varphi.$$

Замечая, что действующие включе и в горизонтальном сечении трубы моменты по абсолютной величине одинаковы, приходим к выводу, что деформации по горизонтальному и вертикальному диаметрам должны быть равны, т. е. $\Delta d_x = \Delta d_z$.

Найдем удлинение горизонтального диаметра из уравнения:

$$\Delta d_x = \left(\frac{\partial V}{\partial P_0} \right)_{P=0} = 4r \int_0^{\frac{\pi}{2}} \frac{\partial}{\partial P_0} \cdot \frac{M^2}{2ESr} d\varphi = \frac{2}{ES} \int_0^{\frac{\pi}{2}} \frac{\partial}{\partial P_0} M^2 d\varphi. \quad (81)$$

Фиктивная сила P_0 должна быть приложена по направлению перемещения. Рассматривая левое экваториальное сечение трубы, находим, что для верхнего квадранта момент, при принятых знаках, от P_0 — положительный. Тогда выражение для общего момента в точке с квадрантом можно будет написать:

$$M = A + P_0 r \sin \varphi.$$

Здесь A — момент от основных сил [уравнение (72)].

Беря частную производную $M^2 = A^2 + 2AP_0 r \sin \varphi + P_0^2 r^2 \sin^2 \varphi$, по P_0 получим:

$$\left(\frac{\partial}{\partial P_0} \right)_{P_0=0} M^2 = 2Ar \sin \varphi + 2P_0 r^2 \sin^2 \varphi = 2Ar \sin \varphi.$$

Произведя интегрирование уравнения

$$\Delta d_x = \frac{4}{ES} \int_0^{\frac{\pi}{2}} Ar \sin \varphi d\varphi, \quad (82)$$

получим для перемещения по горизонтальному диаметру величину:

$$\Delta d_x = 0,33(1 - \mu) \frac{pr^3}{ES}. \quad (83)$$

Из теории кривого бруса известно, что при малых размерах поперечного сечения элемента по сравнению с радиусом кривизны можно принять, что $J = Sr$, тогда окончательно:

$$\Delta d = \Delta d_s = \Delta d_c = 0,33 (1 - \mu) \frac{pr^4}{EJ}. \quad (83')$$

Отсюда нетрудно найти значение для μ :

$$\mu = 1 - \frac{3\Delta d E J}{p r^4}. \quad (84)$$

Таким образом, зная напряжение в ключе или в экваториальном сечении трубы и горизонтальную или вертикальную деформацию под известной нагрузкой, легко найти соотношение μ между горизонтальным q и вертикальным давлением p . Между прочим, из уравнений (80) и (84) можно найти зависимость между напряжениями и деформациями:

$$\frac{\kappa}{\Delta d} = \frac{3EJ}{4\pi r^2} = \frac{3Eh}{8r^2}. \quad (85)$$

Здесь h — полная высота трубы.

Пользуясь формулой (85), можно по деформации Δd довольно просто найти значения максимальных напряжений в трубе.

Пример. Определить максимальное напряжение и величину κ для трубы длиной 1,2 м, внутренним диаметром $d = 0,76$ м, при толщине металла $\delta = 2$ мм, высоте волны $h = 13$ мм и длине ее $\lambda = 70$ мм. Нагрузка — равномерно распределенная $p_1 = 1,5$ кг/см²; начальная деформация $\Delta d_1 = 5$ см. Радиус осевой линии $r = \frac{d}{2} + \delta = 0,63 + 0,02 = 0,65$ м. Отсюда находим напряжение:

$$\sigma_{\max} = \frac{3Eh}{8r^2} \Delta d = \frac{3 \times 2,1 \times 10^6 \times 1,3}{8 \times 39^2} \times 5 = 3370 \text{ кг/см}^2.$$

Число волн в трубе $k = \frac{130}{7} = 18,6$. Момент сопротивления сечения одной волны $W_1 = 0,50$ см³, а по всей длине трубы:

$$W = k W_1 = 18,6 \times 0,5 = 9,3 \text{ см}^3.$$

Погонное давление $p = 130$; $p_1 = 130 \times 1,5 = 195$ кг/пог. см. Определим из (80) значение μ :

$$\mu = 1 - \frac{4\pi W}{pr^2} = 1 - \frac{4 \times 3370 \times 9,3}{195 \times 39^2} = 1 - 0,42 = 0,58 \approx 0,6.$$

Полученные выводы сделаны в предположении кругового очертания трубы. В действительности труба под сравнительно уже небольшой нагрузкой и в виду малого значения μ в начале действия активных вертикальных сил принимает эллиптическое очертание. Поэтому приведенные формулы не совсем точны; расхождение тем больше, чем большие деформации трубы.

Тем не менее, в виду сложности расчета трубы с эллиптическим очертанием в напряженном состоянии применение его с практической точки зрения вряд ли целесообразно, тем более, что при принятых размерах труб и при обычных деформациях отступления от очертания круга особо значительными признать нельзя.

Устойчивость труб под нагрузкой. Для труб как водопроводных сооружений, находящихся под насыщами, более реальной является нагрузка, равномерно распределенная по всей периферии. Поэтому данные об устойчивости и приведены только для этого случая.

Еще в прошлом столетии (1884 г.) Леви удалось разрешить задачу об определении внешнего давления на трубу, при котором она теряет свою первоначальную круговую форму равновесия. Этую нагрузку принято называть „критической“.

Обозначим:

r — радиус оси трубы;

EJ — жесткость поперечного сечения стенки трубы на единицу длины; p_{kp} — критическое давление на единицу поперечного сечения, тогда наименьшее значение критического давления называется из выражения:

$$p_{kp} = \frac{3EJ}{r^4}. \quad (86)$$

Пример. Определить равномерно распределенное давление на трубу диаметром $d = 1,07$ м при размере волны 70×13 мм и длине $\lambda = 40$ м, при котором труба потеряет устойчивость.

$$\text{Величина } r = \frac{d}{2} + \delta = 0,535 + 0,02 = 0,555 \text{ м.}$$

Модуль упругости трубы примем равным $E = 2,1 \times 10^6$ кг/см², момент инерции сечения от волны составляют $J_g = 0,462 \text{ см}^4$, а от волны $J_g = 0,462 \text{ см}^4$.

Отсюда:

$$p_{kp} = \frac{3EJ}{r^4} = \frac{3 \times 2,1 \times 10^6 \times 0,462}{0,555^4} = 34,15 \text{ кг/см}^2.$$

Этот результат хорошо совпадает с давлением в 34 кг/см².

§ 16. Сравнение опытных данных с различными способами расчетов

В соответствии с проделанными опытами ниже будут даны примеры для трубы диаметром $d = 0,76$ м соответственно при сосредоточенном и распределенном действии нагрузки.

В каждом примере определены основные напряжения и в отдельных случаях некоторые расчетные величины, как, например, μ .

Для сравнения расчетные значения будут определены по всем основным приведенным выше способам расчета гофрированных труб.

A. Сосредоточенное давление

Труба диаметром $d_{ch} = 0,76$ м.

Расчетные данные:

Средний диаметр трубы (по осевой линии) $d = 0,773$ м.

Длина трубы $l = 0,65$ м.

Длина волны $\lambda = 70$ мм.

¹ Тимошенко С. П. и Лессельс Д. Принципы гидравлики упругости, 1930, стр. 191.

Полная высота волны $h = 13$ мм.

Толщина стенки $\delta = 2$ мм.

Число волн по длине трубы $k = 9,28$.

Момент инерции одной волны $J_1 \approx 0,325 \text{ см}^4$.

Момент сопротивления одной волны $W_1 = 0,5 \text{ см}^3$.

Площадь сечения одной волны $\omega = 1,53 \text{ см}^2$.

Труба — американского стандарта, калибр 14.

Пример 1. Нагрузка на трубу $P = 260 \text{ кг}$.

Расчетная нагрузка равна примерно четвертой части разрушающей, т. е., как указывалось выше, соответствует допускаемой и распределяется по всей длине трубы в ее ключе равномерно.

Способ Фельдта

Способ расчета Фельдта дает напряжение в трубе по формуле:

$$\sigma = \frac{N}{\omega} + \frac{M}{W}.$$

Аналогично тому, как Фельдт определяет расчетные усилия для распределенной нагрузки, найдем для действия сосредоточенной силы:

$$N = \frac{P}{2} \text{ и } M = \frac{Pr}{2}.$$

Эти величины, как указывалось выше, должны быть уменьшены в 5—10 раз. Уменьшив полученные значения нормальной силы и момента в 10 раз, получим:

$$N = 0,05P = 13 \text{ кг}$$

$$M = 0,05 \cdot Pr = 0,05 \times 260 \times 38,6 = 501 \text{ кгсм}.$$

Отсюда находим напряжение:

$$\sigma = \frac{13}{1,53 \times 9,28} + \frac{501}{9,28 \times 0,5} = 0,9 + 108 \approx 110 \text{ кг/см}^2.$$

Значения опытных напряжений в верхнем ключе составили 119 кг/см², а в нижнем 90 кг/см², или определяются из эмпирической формулы:

$$\sigma = \beta_0 \frac{P_{\text{дав}} d}{W} = 0,0244 \frac{260 \times 77,3}{9,28 \times 0,5} = 106 \text{ кг/см}^2.$$

Напряжения в горизонтальном сечении были искажены деформациями стыка и не могут быть приняты во внимание.

Расхождение между расчетным и измеренным напряжением:

$$\frac{110 - 106}{106} \times 100 \approx 4\%.$$

Таким образом, данный способ расчета дает результаты, весьма близкие к действительным.

Способ Грызевского

Величины N и M формулы внекцентренного сжатия автор определяет, строя в квадранте свода трубы кривую давления. При этом величина N , вместо наибольшего момента и эксцентриситет находятся графически.

Деформации по горизонтальному диаметру во внимание не принимаются.

При сосредоточенном давлении на трубу при таком расчете, считая, что ключевые и пятивые сечения закреплены, наибольший момент будет иметь место в сечении квадранта, получаемом линией, проведенной через центр трубы под углом в 45° к горизонту.

Эксцентриситет равняется стрелке сегмента, хорда которого представляет собой вписанный квадрат. Нормальная сила составляет при этом величину:

$$N = \frac{P}{2 \sin \alpha} = \frac{130}{0,707} = 184 \text{ кг}.$$

$$\text{Эксцентриситет } c = r - \frac{r}{\sqrt{2}} = (1 - 0,707)r = 0,293r = 11,3 \text{ см}.$$

Отсюда:

$$\sigma = \frac{N}{\omega} + \frac{M}{W} = N \left(\frac{1}{\omega} + \frac{c}{W} \right) = 184 \left(\frac{1}{14,2} + \frac{11,3}{4,64} \right) = 462 \text{ кг/см}^2.$$

Расхождение между расчетным замеренным напряжением в этом:

$$\frac{462 - 106}{106} \times 100 = 336\%.$$

Этот расчет дает значительно преувеличенные результаты. Кроме того, место наибольшей напряженности не соответствует действительности.

Способ Леви

Аналогично формуле (12) § 13, составленной для равномерно распределенной нагрузки, для сосредоточенного давления можем принять:

$$\sigma = \frac{P}{2\omega},$$

где P — давление, отнесенное к 1 мм длины, а $\omega = \delta$, так как расчетная полоска имеет ширину 1 мм.

Отсюда:

$$\sigma = 100 \frac{P}{2\delta} = 100 \frac{0,4}{2} = 20 \text{ кг/см}^2,$$

т. е. значительно меньше опытных цифр, что и следовало ожидать, поскольку эта формула не учитывает действия момента. Полученное напряжение примерно в 5 раз меньше замеренного.

Формула Ясевича

Поскольку формула Ясевича выведена для равномерно распределенной нагрузки, для которой дано значение коэффициента c , она будет проверена ниже.

Формула Головина

Формулы Головина будут также проверены в примерах на равномерно распределенную нагрузку.

Формулы (62) — (71)

Напряжение в ключе

$$\sigma = \frac{0,318 Pr}{W} = \frac{0,318 \times 260 \times 38,6}{4,64} = 688 \text{ кг/см}^2.$$

Теоретическое напряжение почти в 7 раз больше замеренного. Деформации трубы по этому способу определяются из формул:

$$\Delta d_s = 0,149 \frac{Pr^3}{EJ} = 0,149 \frac{260 \times 38,6^3}{2,1 \times 10^6 \times 3} = 0,149 \times 2,37 = 0,35 \text{ см.}$$

$$\Delta d_z = 0,136 \frac{Pr^3}{EJ} = 0,136 \times 2,37 = 0,32 \text{ см.}$$

Положение нулевых точек определяется линией, наклоненной к горизонту под углом φ_0 и проходящей через центр трубы.

Угол $\varphi_0 = 50^\circ 30'$.

Замеренные величины оказались равными соответственно $\Delta d'_s = 1,6 \text{ см}$ и $\Delta d'_z = 1,5 \text{ см}$ и определяются из эмпирической формулы:

$$\Delta d \approx \Delta d_s \approx \Delta d_z = \gamma_1 \frac{P_{\text{доп}} d^3}{EJ} = 0,845 \frac{P_{\text{доп}} d^3}{EJ} = 6,75 \frac{P_{\text{доп}} r^3}{EJ}.$$

Значение угла φ из опытов составляет величину $\varphi = 26^\circ$, также значительно отличающуюся от полученной по расчету. Таким образом, проанализированный способ расчета не дает достаточно близких к эксперименту результатов по напряжениям и по всем деформациям, что отчасти объясняется распределенностью нагрузки на части диаметра.

Пример 2. Нагрузка на трубу $P = 810 \text{ кг}$.
Эта нагрузка близка к разрушающей.

Способ Фельдта

$$\sigma = \frac{N}{\omega} + \frac{M}{W} = \frac{0,05 P}{\omega} + \frac{0,05 Pr}{W} \approx \frac{810}{260} \times 110 = 343 \text{ кг/см}^2.$$

Замеренные напряжения равны: в верхнем ключе 1760 кг/см^2 и в нижнем 658 кг/см^2 .

Расчетные напряжения оказываются значительно меньше замеренных.

Способ Грыжевского

Напряжение по способу Грыжевского будет равно, если воспользоваться данными предыдущего примера 1:

$$\sigma = \frac{810}{260} \times 462 = 1440 \text{ кг/см}^2,$$

что довольно близко к замеренным величинам.

Формулы (62) — (71)

Напряжение в ключе

$$\sigma = \frac{810}{260} \times 688 = 2150 \text{ кг/см}^2,$$

что значительно превышает замеренные величины.

Деформации трубы по расчету составляют:

$$\Delta d_s = \frac{810}{260} \times 0,35 = 1,09 \text{ см};$$

$$\Delta d_z = \frac{810}{260} \times 0,32 = 1,0 \text{ см.}$$

Действительные деформации почти в 4 раза больше и составляют

$$\Delta d'_s = 4,4 \text{ см}$$

и

$$\Delta d'_z = 4,3 \text{ см.}$$

Опытное значение угла $\varphi = 36^\circ$ при теоретическом уде $\varphi = 50^\circ 30'$.

Так же, как и при допускаемой нагрузке, расчетные напряжения и деформации, определенные по формулам (62) — (71), значительно отличаются от действительных величин деформаций.

Определения теоретических напряжений по другим формулам (Леви, Ясевича, Голосина), как даваемых для распределенной нагрузки, не делаем.

Таким образом, по данным этого примера видно, что наиболее близкие к действительности результаты дают способ Фельдта для допускаемых сосредоточенных нагрузок и способ Грыжевского для критических сосредоточенных давлений (только по величине напряжений).

Б. Распределенное давление

Пример 3. Труба внутренним диаметром $d_m = 0,76 \text{ м}$.

Расчетные данные те же, что и при сосредоточенном действии нагрузки, за исключением длины трубы ($J = 1,3 \text{ м}$) и числа волн ($k = 18,56$).

Нагрузка на трубу $P = 42 \text{ т}$ или 55 т/пог. м . Эта нагрузка представляет критическое усилие трубы или давление текучести, так как при этом в конструкции происходит значительное перераспределение усилий. Эта нагрузка, как указывалось выше, может быть принята допускаемой.

Способ Фельдта

$$N = 0,05 P = 2100 \text{ кг} \quad M = 0,05 Pr = 0,05 \times 42000 \times 38,6 = 81000 \text{ кгсм}.$$

Расчетная площадь сечения

$$\omega = 18,56 \times 1,53 = 28,35 \text{ см}^2;$$

расчетный момент сопротивления

$$W = 18,56 \times 0,5 = 9,28 \text{ см}^3.$$

Напряжение в трубе по Фельдту:

$$n = \frac{2100}{28,35} + \frac{81090}{9,28} = 74 + 8726 = 8800 \text{ кг/см}^2.$$

Среднее, из двух — верхнего и нижнего — ключевых сечений, опытное напряжение составляет 9655 кг/см^2 .

Таким образом, как замеренное, так и вычисленное по Фельдту напряжение выше нормальных значений временных сопротивлений и довольно близки друг к другу.

Расчетное напряжение меньше среднего замеренного и отличается от него на $\frac{9655 - 8800}{9655} \times 100 = 9\%$.

Результат может быть признан удовлетворительным.

Способ Грыжевского

Из графического построения (см. § 13) определяем: нормальная сила $N = 16400 \text{ кг}$; наибольший эксцентрикитет $c = 5,5 \text{ см}$; напряжение в трубе:

$$n = N \left(\frac{1}{\alpha} + \frac{c}{W} \right) = 16400 \left(\frac{1}{28,35} + \frac{5,5}{9,28} \right) = 10300 \text{ кг/см}^2,$$

что несколько больше полученных максимальных напряжений в ключевых сечениях. Кроме того, расчетное напряжение по своему местоположению не соответствует замеренному.

Способ Лесси

Напряжение в трубе, определяемое по способу Лесси без учета момента, получается весьма малым:

$$n = 100 \frac{Pr}{ld} = 100 \frac{42000 \times 386}{773 \times 1300 \times 2} = 808 \text{ кг/см}^2,$$

или примерно в 12 раз меньше замеренного.

Формула Ясевича

Формула Ясевича дает значения допускаемого на трубу усилия, причем берется шестикратный запас прочности по отношению к разрушающему усилию.

Допускаемая нагрузка на 1 см^2 по горизонтальной плоскости, касательной к замку трубы, определяется из формулы:

$$p = 6 \sqrt{\frac{W}{ld}}.$$

В этой формуле l и d выражены в метрах, момент сопротивления в куб. сантиметрах и взят для длины трубы в 20 см .

Для нашего случая:

$$W = 9,28 \frac{20}{130} = 1,43 \text{ см}^3;$$

$l = 1,3 \text{ м}$; $d = 0,773 \text{ м}$ (теоретический диаметр трубы). Отсюда допускаемое усилие равно:

$$p = 6 \sqrt{\frac{1,43}{1,3 \times 0,773}} = 7,15 \text{ кг/см}^2.$$

На всю трубу допускаемое давление должно быть равно:

$$P = pld = 7,15 \times 130 \times 77,3 = 71800 \text{ кг}.$$

Этот результат значительно выше полученного из эксперимента, считая, что допускаемое усилие должно быть не больше усилия текучести (в данном случае — 42 т).

Таким образом, формула Ясевича дает весьма преувеличенные значения допускаемых на трубу усилий.

Формула Головина

По первому варианту расчета, предложенного Головиным, в выражении расчетных усилий входит величина μ или соотношение между горизонтальным и вертикальным давлением на трубу.

Эту величину он принимает равной $\frac{1}{2}$ и 1.

Значение напряжения в ключе трубы по этому расчету определяется из формулы:

$$n = \frac{Q}{\alpha} + \frac{M_0}{W},$$

При этом:

$$Q = \mu br^2 \gamma \left(\alpha + \frac{1}{2} \right) = 1,3 \times 0,336^2 \times 1,0 (67,6 + 0,5) \mu = 21,1 \mu \text{ т},$$

$$M_0 = br^2 \gamma \left[(1 - \mu) \left(\frac{\alpha}{4} + \frac{2}{3\pi} + \frac{1}{2} \right) - \frac{2}{\pi} + \frac{1}{2} \right] = \\ = 0,12 [17,612 (1 - \mu) - 0,136] \text{ тм}.$$

Примем $\mu = 0,33$, тогда $Q = 7,03 \text{ т}$ и $M_0 = 1,40 \text{ тм}$, и напряжение в ключе составит:

$$n = \frac{7030}{28,35} + \frac{140000}{9,28} = 248 + 15100 = 15348 \text{ кг/см}^2.$$

Получается результат более чем в полтора раза больше замеренной величины.

Для $\mu = 1$ получим:

$$Q = 21,10 \text{ т}, \quad M_0 = 0,0163 \text{ тм}$$

и напряжение

$$n = \frac{21100}{28,35} + \frac{1630}{9,28} = 745 + 176 = 921 \text{ кг/см}^2.$$

Этот результат преуменьшен.

Формула дает хорошее приближение к действительным напряжениям при величине $\mu = 0,5 - 0,6$.

По второму варианту расчета взамен величины μ , значение которой Головину представлялось недостаточно определенным, было введено усилие распора H .

По этому варианту расчетные усилия в ключе определяются из формул:

$$Q_0 = Q + H = (0,707a + 0,098) br^2 \gamma - 6,721 \frac{EJ}{r^3} \Delta d_x = \\ = 14,55 - 157,5 \Delta d_x \text{ кН.}$$

Здесь Δd_x — горизонтальное перемещение пятовых сечений, или деформация горизонтального диаметра.

$$M_0 = (0,031a - 0,014) br^3 \gamma + 2,442 \frac{EJ}{r^2} \Delta d_x = \\ = 0,251 + 22,5 \Delta d_x \text{ кНм.}$$

Величину Δd_x из опыта берем равной $\Delta d_x \approx 0,09 \text{ м}$. Отсюда напряжение:

$$\sigma = \frac{Q_0}{\omega} + \frac{M_0}{W} = \frac{350}{28,35} + \frac{22,5 \cdot 0,09}{9,28} = 12 + 24600 = 24612 \text{ кг/см}^2.$$

Результат получается чрезвычайно преувеличенный.

Из двух вариантов расчета, предложенных Головиным, первый является более приемлемым. При условии $\mu = 0,5 - 0,6$ этот вариант дает хорошее приближение к данным эксперимента.

Формулы (72) — (85)

Напряжение в ключе по формуле (78) выражается в виде:

$$\sigma = \frac{N_0}{\omega} + \frac{\tau}{\omega} = \frac{\mu pr}{\omega} + \frac{0,25(1-\mu)r^2}{W}.$$

Для определения напряжения необходимо знать величину μ .

Определим эту величину по формулам (80) и (84).

В первом случае значение μ определяется по данным напряжений, во втором — по деформации.

Значение μ по напряжению:

$$\mu = 1 - \frac{4\pi W}{pr^2} = 1 - \frac{4 \times 9655 \times 9,28 \times 77,3}{42000 \times 38,6^2} = 0,558.$$

Значение μ по деформации ($\Delta d = 0,09 \text{ м}$):

$$\mu = 1 - \frac{3\Delta d EJ}{pr^4} = 1 - \frac{3 \times 9 \times 2100000 \times 6,04 \times 77,3}{42000 \times 38,6^4} = 0,716.$$

С достаточной степенью точности можно принять величину μ равной 0,6.

Зная μ , находим напряжение в ключе:

$$\sigma = \frac{0,6 \times 42000 \times 38,6}{77,3 \times 28,35} + \frac{0,25 \times 0,4 \times 42000 \times 38,6^2}{77,3 \times 9,28} = \\ = 445 + 8730 = 9175 \text{ кг/см}^2.$$

Полученный результат весьма близок к средненормированной величине изгиба.

Расхождение составляет:

$$\frac{9075 - 9175}{9075} \times 100 = 5\%.$$

Таким образом, наилучшую сходимость с данными опыта дают способы расчета по формулам (72) — (85), по Фельдзу и по формуле Головина (1-й вариант), если принять для исследований $\mu = 0,5 - 0,6$.

В результате можно формулы (72) — (85) рекомендовать для практического использования, как сравнительно простые и достаточно обоснованные.

Для данного способа расчета даются формулы определения деформаций (83) и критических нагрузок устойчивости (86).

Проверим эти формулы.

Деформация трубы по горизонтальному диаметру в данном примере составляет в натуре 0,69 м.

По формуле (83) получим:

$$\Delta d_x = 0,33(1-\mu) \frac{pr^4}{EJ} = 0,33 \times 0,5 \frac{pr^4}{EJ} \\ = 0,132 \frac{42000 \times 38,6^4}{77,3 \times 2100000 \times 6,04} = 12,5 \text{ см.}$$

Расхождение теоретического и опытных данных:

$$\frac{12,5 - 9}{12,5} \times 100 = \frac{12,5 - 9}{9} \times 100 = 39\%.$$

Теоретические деформации при $\mu = 0,6$ наолько большие действительных.

Найдем из формулы (86) значение критической силы устойчивости. Преобразуя несколько эту формулу, имеем критическое усилие P_{kp} равным:

$$P_{kp} = \frac{6EJ}{r^2} = \frac{6 \times 2100000 \times 6,04}{38,6^2} = 51000 \text{ кн} = 51 \text{ т.}$$

По опыту же критическое усилие зафиксировано при 42 т.

Расхождение между теоретическим и экспериментальным результатами составляет:

$$\frac{51 - 42}{42} \times 100 \approx 21,5\%.$$

Критическое усилие, полученное теоретическим путем, несколько выше экспериментального.

В общем два последних теоретических показателя, хотя и несколько больше экспериментальных, тем не менее все же достаточно близки к ним.

Отсюда можно сделать вывод, что в случае разномерно распределенной нагрузки последний из разобранных способов расчета дает достаточно близкие к действительности результаты и по деформациям и по критическим усилиям.

Подводя итоги сравнения различных способов расчета, можно сделать два вывода.

Первый вывод. В случае сосредоточенной нагрузки для допускаемых усилий наилучшие результаты дает формула Фельдта.

Второй вывод. Для допускаемой распределенной нагрузки наиболее близкие к действительности результаты получаются при использовании формулами (72) — (85).

ОБЩИЕ ВЫВОДЫ

1. По вопросу о применении гофрированных труб

Благодаря ряду своих преимуществ (см. § 4) гофрированные трубы являются одним из наиболее рациональных типов искусственных сооружений малых отверстий для автомобильных дорог.

Необходимо широко внедрять эту конструкцию в дорожное строительство, особенно в горных условиях и для военно-полевых дорог.

Развитие этого типа сооружений возможно при условии выпуска промышленностью достаточного количества гофрированного оцинкованного металла, но возможности с минимальным количеством примесей, приближающегося по качеству к железу „Атисе“ (см. § 5).

Применяя правильные методы расчета и производства работ при сооружении гофрированных труб, строители дорог дают нашей стране экономически выгодные и технически совершенные типы искусственных сооружений малых отверстий.

Срок службы гофрированных труб по данным о существующих сооружениях (см. § 8 и 9) может быть принят минимум в 30 лет.

Особого внимания заслуживает вопрос о применении гофрированных труб из автомагистралях, так как опыт строительства автомобильных дорог показал, что широкое распространение железобетонных труб, ввиду ряда их недостатков, нельзя признать целесообразным.

2. По вопросу о производстве работ

Следует считать, что применению подлежат трубы как клепанные, так и со специальными скреплениями.

Первые типы труб надлежит применять при укладке труб в насыпь с помощью домкратов (см. § 7). Вообще этот метод работ нужно широко внедрить в нашу практику при строительстве труб под насыпями.

Трубы со скреплениями более удобны в смысле монтажа. Поэтому при обычных способах работ следует применять именно эти типы конструкций.

При производстве работ следует в точности соблюдать указания § 6 и 7, для чего желательно издание соответствующей инструкции.

3. По расчету

Внешние давления на трубы, как жесткие, так и гибкие, следует определять по методике, разработанной в США [формулы (33) и (48) § 14 и графики фиг. 86—89].

Определение деформаций и напряжений в трубах, лежащих в насыпи, можно производить по формулам (72) — (83) (§ 15).

Большую пользу также в этом направлении могут принести эмпирические формулы (1) — (9) (§ 12).

Для уточнения всех вопросов, связанных с проектированием и постройкой гофрированных труб, следует технические условия на сооружение и проектирование мостов и труб на автомобильных дорогах дополнить соответствующими параграфами.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Наглоцкий М. А. Блочное волнистое железо. Журнал „Известия о путях сообщения“, № 7 и 8, 1884.
2. Фельдт В. Трубы из гофрированного оцинкованного железа под железнодорожным путем. Журнал „Железнодорожное дело“, № 19, 1890.
3. Страхов П. Волнистое железо. 1899.
4. Ясевич Ф. К. Железные оцинкованные трубы и их применение под железнодорожными насыпями. Журнал „Известия собрания инженеров путей сообщения“, № 8, 1901.
5. Ясевич Ф. К. О железных гофрированных трубах. Доклад. Журнал „Известия собрания инженеров путей сообщения“, № 35 и 36, 1912.
6. Фельдт В. Дополнения к докладу инж. Ф. Ясевича. Журнал „Известия собрания инженеров путей сообщения“, № 5, 1914.
7. Фельдт В. Новый тип искусственных сооружений малых отверстий. Варшава, 1914.
8. Ишх. Б. Г. Гофрированные трубы. Журнал „Строительная промышленность“, № 11, 1925.
9. Фельдт В. Гофрированные трубы. Журнал „Строительная промышленность“, № 10, 1927.
10. Фельдт В. Опыт применения труб из волнистого железа в дорожном деле и инсталляции. Журнал „Строительная промышленность“, № 5, 1929.
11. Борзыхин М. Трубы из волнистого железа под железнодорожные насыпь. Журнал „Строительная промышленность“, № 5, 1929.
12. The Manufacture of Commercially Pure Iron—California Corrugated Culvert Company.
13. Walter S. Lacher. Is the Corrugated Iron Culvert Adapted to Railroad use? Журнал „Railway Engineering and maintenance“, № 6, 1924 г.
14. G. P. Gilmore. Corrugated Culverts on the Western Pacific. Журнал „Engineering Contracting“, октябрь, 1924 г.
15. Proceedings Highway Research Board, декабрь, 1925 г.
16. Bulletin American Railway Engineering Association, т. 27, № 284, 1926 г.
17. Bulletin American Railway Engineering Association, т. 28, № 303, январь, 1928 г.
18. Bulletin Iowa State College Experiment Station, № 31.
19. Proceedings thirty-eighth Annual Convention of the American Railway Bridge and Building Association, октябрь, 1928 г.
20. Bulletin American Railway Engineering Association, т. 30, № 319, октябрь 1928 г.
21. Bulletin American Railway Engineering Association, т. 31, № 356, июнь 1933 г.

Оглавление

Предисловие	2
Глава I. Краткий исторический очерк	
§ 1. Применение гофрированных труб в России	3
§ 2. Применение гофрированных труб за границей	5
Глава II. Описание конструкции гофрированных труб и их характеристика и давление о материалах	
§ 3. Конструкция гофрированных труб	6
§ 4. Характеристика гофрированных труб	13
§ 5. Материалы, примененные для гофрированных труб	17
Глава III. Постройка гофрированных труб	
§ 6. Постройка гофрированных труб в России	22
§ 7. Постройка гофрированных труб в США	27
Глава IV. Эксплоатационные данные	
§ 8. Архивные данные из-за границы	43
§ 9. Эксплоатационные данные США	43
Глава V. Экспериментальные данные о прочности и стойкости труб	
§ 10. Опыты Петербургского металлического завода	45
§ 11. Опыты над гофрированными трубами в США	46
§ 12. Опыты автора	64
Глава VI. Расчетные данные	
§ 13. Методы расчета труб из гофрированного металла	73
§ 14. Данные о внешнем защемлении	80
§ 15. Теория расчета гибкого кольца	94
§ 16. Сравнение опытных данных с различными способами расчетов	101
Общие выводы	110
Список литературы	111

Редактор И. П. Ермолов. Зав. корректурой А. А. Лелякит Техн. редактор
Петровская

Уполн. Главлитта А-1273. Издат. № К-31. Заказ ти. 1303. Тир. ж. 4000. Бум. 6-х92/ш. Г. 84. л. 2.
Печ. эн. в 1 п. л. № 4700. Учетно-издат. л. № 27

Сдано в набор 16/II. 1939 г. Подписано к печати ИЖ 1939 г.

Отпечатано с матриц 1 Образцовой типографии ОГИ а РСФСР ти-ца „Полиграфик“.
Москва, В. Лобзя, 28

—я тип. Трансцендериздата НИИС. Москва, Каланчевский туп., д. 3/5. Зак. ти. 140.