

ТЕХНОЛОГИЯ ПРИМЕНЕНИЯ УСТАНОВОК ЦЕНТРОБЕЖНОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ДЛЯ РЕШЕНИЯ ГЕОТЕХНИЧЕСКИХ ЗАДАЧ

(ЧАСТЬ 02 установка центробежного моделирования РУТ(МИИТ). Центрифуга и вспомогательные устройства по опыту эксплуатации)

Зайцев А.А.

05 февраля 2019 г.

АННОТАЦИЯ: Данный препринт (второй по счету) продолжает тему технологии применения центробежного моделирования, начатую в препринтах [10 и 11].

Ключевые слова: транспорт, инфраструктура транспорта, земляное полотно, технологии, физическое моделирование, установка центробежного моделирования, история, коромысло, редуктор привода, ведущий и ведомый вал, каретка, система Леонардо, система Вард-Леонарда, строительство, система управления, система измерений, токосъем, сельсины

ВВЕДЕНИЕ

Комплекс физического моделирования грунтовых сооружений РУТ(МИИТ) включает собственно установку центробежного моделирования (разработки и установки в 1959-1961 г.г.) и комплекс вспомогательных устройств, созданный в Путьиспытательной лаборатории, секторе земляного полотна (1961–1997 г.г.), позднее учебно-исследовательском центре «Моделирование инженерных сооружений» (2000-2016г.г. и по настоящее время) кафедры “Путь –путевое хозяйство” ИПСС РУТ (МИИТ).

2.Центрифуга и вспомогательные устройства

На основе нового послевоенного опыта [1] и благодаря инициативе Шахунянца Г.М. и Яковлевой Т.Т. в Московском Институте Инженеров Инженеров Транспорта (МИИТ) машина центробежного моделирования (центрифуга, установка центробежного моделирования) была построена и начала действовать в начале 60-х годов. На протяжении 40 лет руководителем группы центробежного моделирования являлся Д.И.Иванов, группа работала под научным руководством Яковлевой Т.Г.

Установка представляет собой комплекс машин и измерительных систем, с помощью которых обеспечивается проведение исследований с необходимой точностью. Центробежную установку можно отнести к основному типу центрифуг коромыслового типа, используемых в мировой практике. Практически машина позволяет модулировать объекты в масштабах

от 1:10 до 1:320, что дает возможность набирать оптимальные масштабы моделирования для каждого конкретного случая. При исследовании земляного железнодорожного полотна, как правило, используются масштабы в диапазоне 1:50-1:150[3-6].

Центробежная установка конструкция которой была разработана и изготовлена Новокаматорским заводом (г.Электросталь [2]) при эксплуатации с 1961 по 1996г.г. размещалась в трех залах Путьиспытательной лаборатории кафедры “Путь и путевое хозяйство” МИИТа (экспериментальном, машинном, в зале пульта управления) и других помещениях (в т.ч. хранилище грунтовых кернов, в объеме необходимом для моделирования и помещение для перемола комьев сухого грунта).

В экспериментальном зале размещалась установка центробежного моделирования, вес машины, включая вес электрооборудования 10,144 тонны (рисунок 2.1, Приложение) проводилось собственно физическое центробежное моделирование грунтовых сооружений (в основном моделей земляного полотна железных дорог), была установлена измерительная аппаратура и располагались различные вспомогательные приспособления для приготовления, взвешивания и обмеров моделей, подъема и спуска кареток в центробежную камеру, а также для проведения других работ, связанных с различными экспериментами.

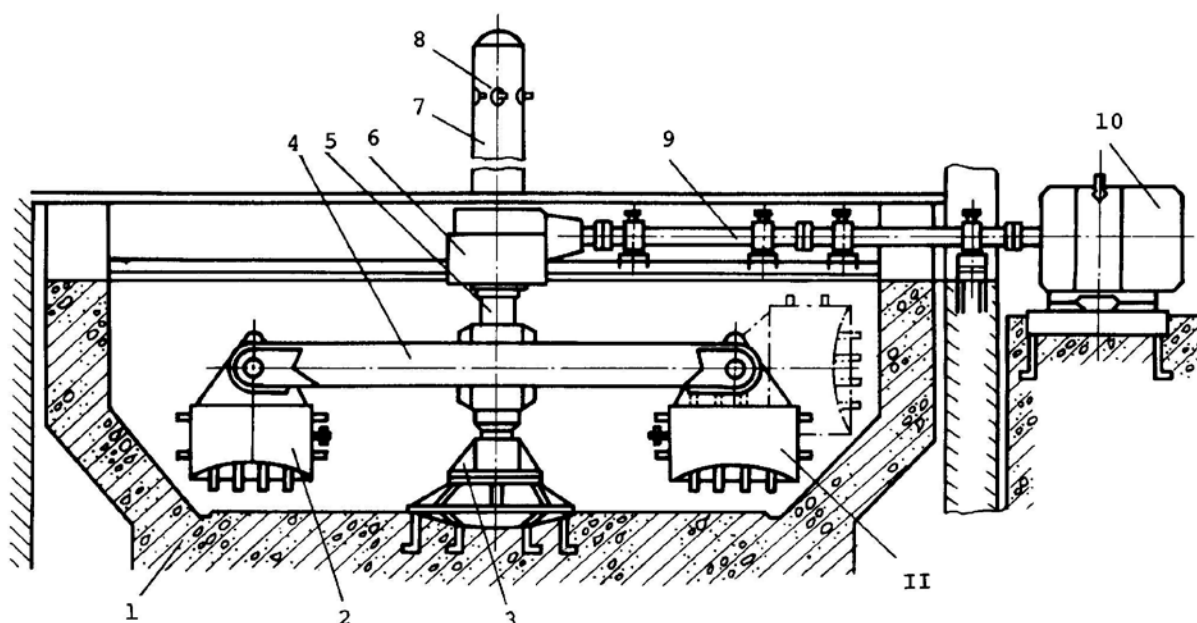


Рисунок 2.1 Установка центробежного моделирования РУТ (МИИТ) [4,6]



Генератор и данные производителя

Магнитная станция

Двигатель постоянного тока

Рисунок 2.2 Система Леонардо: электродвигатель центробежной установки до модернизации (фото А.А.Зайцев)

В машинном зале размещался электропривод – система Леонардо (или система Вард-Леонарда). В этой системе питание якоря электродвигателя производится напрямую от генератора без преобразовательных устройств [7,8].

Управление и контроль над всеми агрегатами и механизмами централизованное, дистанционно осуществлялось из **помещения пульта управления**.

Электропривод (до 2003 г)

Привод машины осуществлялся от электродвигателя постоянного тока мощностью 200 квт, 1150 об/мин типа ПН-1750, подключенного в сеть по системе Леонардо [4]. Вал привода разъемный, состоит из двух частей, сочлененных с помощью муфт. Вся конструкция скрыта в монтажном проеме.

Преобразовательная установка представляла собой трехмашинный агрегат (двигатель, генератор, возбуждатель), собранный на общей раме. Асинхронный электродвигатель с фазовым ротором мощностью 320 квт типа АК-П2-4 включается в сеть магнитной станцией — ПН-6120-55-А3. Запуск производится в три ступени автоматически при подаче команды с пульта

управления. Станция осуществляла тепловую и электромагнитную защиту. Контроль по временному току проводился электроизмерительными приборами, установленными на вводном шкафу. Генератор мощностью 220 кВт типа П-103 и возбудитель ПН-100 электрически связаны с приводом двигателем через панель управления постоянным током.

Центрифуга была вторично запущена в эксплуатацию 30.07.2005 г. При сотрудничестве РУТ(МИИТ) ФСК «МостГеоцентр» после модернизации и замены электропривода.



Рисунок 2.3 Запуск центробежной установки после замены электропривода 30.07.2005 г.

(на фотографии слева направо: Громов Е.М., Зайцев А.А., Гл. Энергетик Соколов В. , Фроловский Ю.К., фото А.В.Кузнецов)

Механическая часть

Конструктивно установка центробежного моделирования состоит из следующих основных узлов (см. рисунок 2.1) [2,3]: центробежной камеры 1, кареток 2 и 11, коромысла 4, вертикального вала 5 с нижней опорой 3, редуктора 6, токосъемного устройства 7, гидравлической системы 8, горизонтального вала 9 и тягового двигателя 10.

Центробежная камера из условия безопасности выполнена в виде закрытого железобетонного котлована цилиндрической формы. Камера является несущим корпусом, на котором смонтирована вся подвижная часть машины. Стенки камеры имеют двойное армирование и были рассчитаны на аварийный отрыв каретки. В днище корпуса забетонирована опорная плита, служащая для установки нижней опоры вертикального вала.

Верхнее перекрытие выполнено в виде двух сегментов, между основаниями которых образован монтажный проем. В монтажном проеме размещены: редуктор и горизонтальные валы привода, а также проложены кабели измерительной аппаратуры. Проем закрывается металлическими крышками.

Кроме этого, корпус имеет нишу и эксплуатационный люк, служащие для снятия и навешивания кареток.

Редуктор привода состоит из конической пары с передаточным **числом 3.37**, ведущего и ведомого валов, корпуса и крышки. Ведомый вал редуктора сочленяется с вертикальным валом через зубчатое зацепление.

Вертикальный вал центрифуги в верхней части пустотелый. Нижняя опора вала имеет радиальный сферический подшипник и подпятник. Верхняя опора вала находится в редукторе. По пустотелой верхней части вала проходят трубопровод гидравлической системы и кабель к электрическим датчикам и приборам, расположенным в моделях. Для выхода трубопровода и кабеля в нижней пустотелой части вала имеются боковые щели, расположенные в нейтральных зонах нагружения [4].

Нижняя опора состоит из двух частей: верхней - корпус подшипника и нижней - опора. Разъём опоры позволяет производить замену подшипников без демонтажа всей конструкции машины.

Коромысло центрифуги изготовлено из четырех неразрезанных металлических полос, соединенных между собой поперечными накладками. На концах коромысла сделаны уши с запрессованными втулками для сочленения с каретками. В середине вварена на косынках ступица для посадки коромысла на вертикальный вал центрифуги.

Каретка (для размещения моделей) сварной конструкции из листовой стали (рисунок 2.4). Боковые стенки ее переходят в уши, усиленные дополнительно накладками и ребрами. В уши запрессованы втулки для сочленения каретки с коромыслом.

Под днищем каретки устроен поддон для сбора воды, спускаемой, при надобности, во время моделирования. В одной из боковых стенок каретки имеется прямоугольный вырез. В него помещена рамка со стеклом, которое позволяло производить теле-фото-кино съёмку модели во время работы машины.


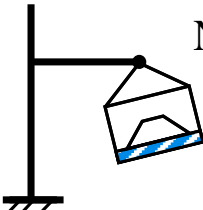
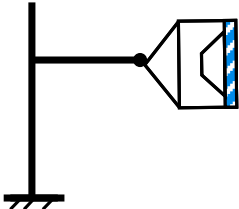
	<div data-bbox="863 152 1433 398">  <p>$N=10 \text{ об/мин,}$ $\beta=25^\circ$</p> </div> <div data-bbox="863 421 1433 667">  <p>$N=134 \text{ об/мин,}$ $\beta=90^\circ$</p> </div>
Каретка с ограничителями модели	Положение кареток при различной частоте вращения

Рисунок 2.4. Каретки для размещения моделей в центрифуге

Для уменьшения лобового сопротивления (воздуха) был предусмотрен кожух.

Кожух сварной конструкции из сварной стали, состоит из двух частей - хвостовой и лобовой. Части кожуха крепятся к каретке с помощью приваренных шайб и вырезов для шайб на торцевых листах каретки, а также дополнительно прижимаются винтами.

Гидросистема Центрифуга была оборудована гидравлической системой с дистанционным управлением. Она позволяла закачивать и откачивать воду в каретки во время эксперимента. [4].

Для отвода отработанной жидкости из центробежной камеры смонтирована специальная система откачки разработанная под руководством Иванова Д.И. Система имела водоприемный колодец с отстойником, самовсасывающий центробежно-вихревой насос с электроприводом и релейную ячейку управления с датчиком уровня.

Отработанная вода из поддонов кареток самотеком поступает в колодец по водосливной трубе, постепенно отстаиваясь в отстойнике от грунтовых взвесей. При поднятии воды до определенного уровня срабатывает датчик, посылая сигнал в ячейку, которая включает насос. Таким образом, система позволяла автоматически "следить" за уровнем воды в колодце и своевременно проводить откачку воды. Система состояла из пульта гидравлического управления; гидроколлектора; сливного клапана;

наконечника и трубопроводов. Сливной клапан служил для спуска воды из каретки в поддон. Управление клапаном дистанционное с пульта гидравлического управления. Для открытия клапана используется центробежная сила воды. Наконечник размещался в каретке и служил для торможения падающей на модель воды[4].

Пульт гидравлического управления служил для налива воды в каретку и для открывания клапана во время слива воды из каретки. Принцип работы гидравлического пульта дистанционный. С помощью мерной шкалы определялось количество налитой воды в каретку.

Технические характеристики центрифуги РУТ (МИИТ) приведены в таблице 2.1

Таблица 2.1 Технические характеристики центрифуги РУТ (МИИТ)

Наименование	Величина
Максимальное число оборотов машины, об/мин	340
Эффективный радиус вращения R, м	2.5
Время непрерывного моделирования, ч	38
Максимальные габариты модели, мм:	
длина	900
ширина	400
высота	240
Максимальная допустимая масса модели G, кг	170
Максимальное допустимое количество воды, подаваемое в каретку, л	36

Вспомогательные устройства центрифуги

Процесс моделирования сопровождается рядом вспомогательных устройств, позволяющих механизировать трудоемкие работы и повысить эксплуатационные качества машины.

Тельфер

Процесс приготовления моделей требует постоянного снятия и навешивания кареток на коромысло с подъёмом их в экспериментальный зал.

Для этой цели в экспериментальном зале установлен электротельфер (рисунок 2.5). Тельфер передвигается по балке, расположенной по оси эксплуатационного люка, что позволяет механизировать такие трудоёмкие работы, как монтаж и демонтаж кареток, подъём их из центробежной камеры в зал, перемещение по залу, снятие крышек люка. Кроме этого с помощью тельфера производится установка кареток на весы.

Габаритные размеры тельфера

Размеры в мм										
H1	L	L1	L2	B	B1	C	C1	h1	h	H
Не более										
1200	1160	560	500	430	500	230	320	220 или 150	20	Не менее
										30 6000

Тельфер для перемещения кареток

Параметры тельфера

Рисунок 2.5 – Тельфер для подъема кареток центрифуги

Контрольно-измерительная аппаратура

Съём электрических сигналов на центрифуге осуществлялся с помощью специального токосъёмника, состоящего из токосъёмных колец, смонтированных на полом валу, и пакетов щеткодержателей и корпуса. Центрифуга также была оснащена аппаратурой, позволяющей воспроизводить воздействие динамической поездной нагрузки на основную площадку земляного полотна.

Однако точность измерений с помощью тензодатчиков определяется условиями качественной работы токосъёмного устройства, работа которого характеризуется величиной изменения переходного сопротивления в скользящем контакте, и которое не должно оказывать влияния на измерения и не искажать их результаты.

На центрифуге МИИТа токосъём осуществляется при помощи щеточного токосъёмника, который при надлежащем уходе обеспечивает надежную работу с разнообразной измерительной аппаратурой на всех режимах моделирования.

Центрифуга МИИТа для проведения измерений при моделировании оборудовалась различными устройствами и датчиками.

Тензометрическая запись перемещений

Использовалась многоканальная система, состоящая из воспринимающего устройства - датчиков осадки, передающего устройства – линий связи и регистрирующего устройства – осциллографа.

Диапазон измеряемых осадок тензодатчика ± 20 мм.

В качестве регистрирующего устройства на машине МИИТа был использован шлейфовый осциллограф типа ОТ-24-51, позволяющий одновременно осуществлять регистрацию 24 процессов на фотобумаге шириной 200 мм.

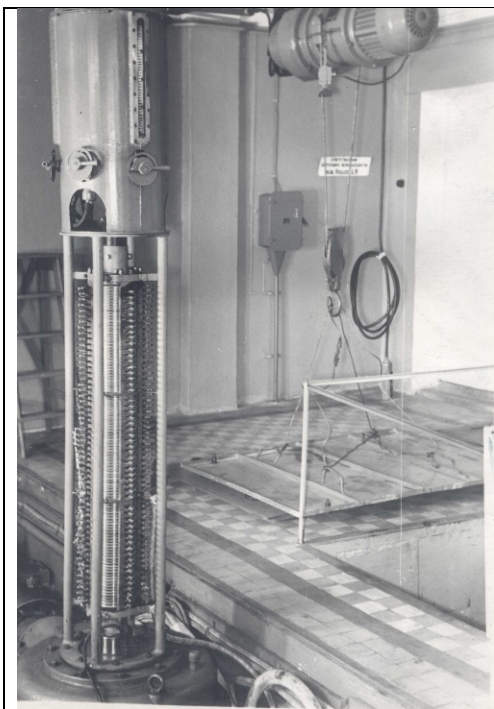


Рисунок 2.6 -
Токоъемное
устройство
центрифуги
МИИТ

Тензодатчик перемещений простой конструкции использовался для фиксации деформаций разных знаков.

Регистрация перемещений с помощью сельсинов.

Дистанционной измерительной системой перемещений на центрифуге МИИТа являлась синхронно-следящая сельсинная система.

Сельсины - это измерительные устройства трансформаторного типа принцип действия которых основан на изменении потокоцепления при относительном повороте первичных и вторичных обмоток. На машине МИИТа были использованы сельсины СС-15, питание которых осуществляется переменным током повышенной частоты (500 Гц) напряжением 110 В от преобразователя типа АМГ.

Использование сельсинной системы позволяло при одних и тех же приемниках замерять перемещения различных точек модели как на поверхности, так и в теле ее. Конструктивно датчик представляет собой сельсин, помещенный в корпус, на ось которого при одном конструктивном решении насажен микрометрический триб, при другом калибровочный двухсекционный барабан.

Применялись следующие варианты исполнения датчиков:

- 1) реечный двух типов, с возможностью измерения перемещений от 10мм до 60мм с соответствующей точностью 0.001...0.05 мм;
- 2) секторный- измерение перемещений до 10 мм с точностью 0.025мм;
- 3) барабанного двух типов – измеряет перемещения до 60 мм с точностью 0.015...0.005 мм.

Датчики устанавливались в каретке над моделью на специальной съемной балке. Для замера деформаций в одной точке используется один измерительный канал, одна сельсинная пара - датчик и приемник.

С применением датчиков отслеживали осадки точки на модели, величина которого определяется по углу поворота стрелки приемника.

Осадка S_m фиксируемой точки модели определялась по формуле

$$S_m = (A_2 - A_1)K, \quad (2.1)$$

где A_1, A_2 - первоначальные и последующие показания приемника (в делениях); K – тарировочный коэффициент.

Кроме того, для анализа результатов моделирования на центрифуге МИИТа применяются вспомогательные методы измерений: оптический и натурный.

Оптический метод включает фотографирование моделей до и после моделирования с боковой стороны через прозрачную стенку каретки, и сверху. Этот метод дает качественную картину деформирования модели, так как необходимо учитывать, силы сопротивления грунта модели по стенке каретки отличаются от сопротивляемости грунта внешним воздействиям в ее средней части.

При использовании маркеров этот метод позволяет отслеживать перемещений частиц в грунтовом массиве.

Натурный метод позволяет фиксировать совокупность перемещений точек модели при помощи профилемера.

С помощью профилимера производятся измерения контура модели в ее средней части до и после моделирования, и оценивается изменение ее формы.

Абсолютная погрешность измерений при помощи профилемера не превышает 0.5 мм.

Регистрация предельного равновесия модели.

Система предельного равновесия, установленная на центрифуге МИИТа позволяет контролировать предельное равновесие модели в восьми сечениях одновременно. Датчиками системы являются полоски листовой оловянной фольги толщиной 0.005...0.01 мм шириной 1.5...2 мм различной длины. Полоски подпаивали к специальным якорям, с помощью которых закрепляли в контролируемых сечениях модели.

Основные рабочие параметры системы: чувствительность - срабатывание датчика от образовавшейся трещины – 0.3...0.4 мм; минимальное расстояние параллельной укладки рабочих датчиков - 2...3 мм; максимальное механическое усилие разрыва датчика 0.08..0.1 Н.

Список использованных источников

1. Параметры и характеристики для центробежного моделирования / Отчет о НИР «Методы центробежного моделирования оснований железнодорожных сооружений», индекс ЛОФЗ – 03 – 51./ Руководитель темы к.т.н. В.А. Ярошенко. ЦНИИС, 1951
2. Паспорт машины. Машина центробежного моделирования/ Инв.№ ПМ-5098/ Министерство тяжелого машиностроения СССР, Главное управление металлургического машиностроения, Ново-Краматорский машиностроительный завод, г. Электросталь, 1958.- 14 с.
3. Определение расчетных параметров машины для центробежного моделирования сооружений из грунта/ Отчет о НИР «Комплексное исследование работы пути под нагрузкой»/ Руководитель Г.М. Шахунянц.-М., МИИТ, 1962.- 99 с.
4. Яковлева Т.Г., Иванов Д.И. Машина для центробежного моделирования, её параметры и характеристики// Труды МИИТ. -М.: Изд-во МИИТа, 1963. Вып.177.-С.147-164.
5. Козлов В.А. Влияние режима разгона машины на результаты центробежного моделирования // Труды МИИТ. - М.: Изд-во МИИТа, 1968. Вып.273.-С.59-73.
6. Яковлева Т.Г., Иванов Д.И. Моделирование прочности и устойчивости железнодорожного полотна.- М.: Транспорт, 1980.-255с.
7. Electrician: 11.06.2015 <https://elenergi.ru/sistema-generator-dvigatel-ili-sistema-leonardo.html>
8. Система Вард-Леонарда: https://ru.wikipedia.org/wiki/Система_Вард-Леонарда
9. Центробежная установка МИИТа, конструкция, электропривод, специальные службы (ссылка от 30.05.2018) <http://www.scribu.com/15/83596111589.php>
10. Зайцев А.А. Технология применения установок центробежного моделирования для решения геотехнических задач (часть 01 исторические сведения и результаты исследований), 21 января 2019 г. doi: <http://dx.doi.org/10.24108/preprints-3111959>
11. Зайцев А.А. Технология применения установок центробежного моделирования для решения геотехнических задач (часть 03 методика моделирования: на основе опыта работы на центробежной установке РУТ (МИИТ)), 26 января 2019 г. doi: <http://dx.doi.org/10.24108/preprints-3111962>

**Приложение Наименование и комплектация деталей машины по паспорту
[2]**

Количество			№№ п/п	Наименование	Мате риал	Кол. на ком.	1шт	ком	1шт	ком	№№ черт ежа	№№ нормал. и станд.
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
Вес машины, включая вес электрооборудования = 10144 кг												
		3		Электрооборуд. (СЭ-1518)	гот. изд.	1	2160	2160				
Вес машины без электрооборудования = 7984 кг												
		24	80	Шпилька М 30х100 АІК	Ст.3	8	0.71	5.68			Ш683	ОСТ 20001- 38
		24	79	Болт чист. М 30х100 УІІК	Ст.3	8	0.83	6.64			Б508	ОСТ/ НКТП 3523
		12	78	Гайка устан. 3 М 120х2F	Мст.6	4	1.246	4.984			СН4- 2667	
		12	77	Шайба	Ст.3	4	0.63	2.52			4-22 4617	
		12	76	Палец	Сталь 45	4	37	148			4-22 4615	
		96	75	Винт М10х18	Ст.3	32	0.016	0.512				ГОСТ В1474- 42
		96	74	Винт М6х12	Ст.3	32	0.004	0.128			Г142	ГОСТ В1474- 42
		6	73	Кожух каретки хвостовой	Сб.4	2	41	82			1- 6994 2	

		6	72	Кожух каретки лобовой	Сб.4	2	17	34			2-63259	
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
		18	71	Гайка	Ст.5	6	0.014	0.084			4-21 2344	
		12	70	Болт фундам.М16х /100	Ст.3	4	1.2	4.8			СН4-3739	
		3	69	Рама электродвигателя	Сб.4	1	330	330			2-63296	
		12	68	Шпилька М 36х130	Ст.3	4	1.31	5.24			Ш699	ОСТ 20001-38
		12	67	Болт фундам.М36х1400/400	Ст.3	4	13	52			СН4-3746	
		6	66	Кожух коромысла II	Ст.0	2	8	16			3-10 4772	
		6	65	Кожух коромысла I	Ст.0	2	5.2	10.4			3-10 4771	
		6	64	Пробка К 3/8" труб.	Ст.3	2	0.027	0.054				со скл.
		3	63	Труба сливная	Ст.0	1	0.6	0.6			4-22 4622	
		3	62	Угольник К 1/2" труб.	Ст.3	1	0.25	0.25				со скл.
		3	61	Ниппель К 1/2" х 65 труб.	Ст.3	1	0.1	0.1				со скл.
		3	60	Опора нижняя	30 л	1	510	510			2-63297	
		3	59	Корпус нижн. подшипн.	30 л	1	135	135			3-10 4671	
		3	58	Плита	Сб.4	1	440	440			2-63426	
		144	57	Гайка М 30	Ст.3	48	0.22	10.61				ГОСТ 5909-51
		24	56	Болт М 30х120 т.1.	Ст.3	8	0.85	6.8				ОСТ 20035-38
		3	55	Гнездо	Сталь 45	1	11	11			4-22 4612	
		3	54	Пята	Сталь 45	1	5.2	5.2			4-22 4613	

Продолжение таблицы приложения

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
		3	53	Шарикоподшипник №8324	гот. изд.	1	10.9	10.9				ГОСТ 6874-54
		3	52	Уплотнение Ø150 / Ø180 δ=20	вой- лок	1	0.06	0.06			6/ч	
		6	51	шпонка призм. скр Н 45х25х140	Ст.6	2	0.9	1.8			4- 77424	
		3	50	Втулка поворотная	Сталь 45	1	46	46			4-22 4618	
		12	49	Гайка М 20	Ст.3	4	0.073	0.292				ГОСТ 5909-51
		12	48	Штифт конич 25х100	Ст.5	4	0.49	1.96			СН4- 1926	
		3	47	Кольцо промежуточное	Ст.3	1	1.5	1.5			4-22 4614	
		3	46	Роликоподшипник №3624	гот. изд.	1	22	22				ГОСТ 5721-51
		3	45	Крышка	Мст.3	1	8.5	8.5			3-10 4773	
		18	44	Шайба пружинная 12	65 г	6	0.005	0.03				ГОСТ 6402-52
		18	43	Болт М 12х25 т.1	Ст.3	6	0.035	0.21			Б 1209	ОСТ 20035-38
		6	42	Каретка	Сб.4	2	854.5	1709			1- 69947	
		6	41	Наконечник	Сб.4	2	0.53	0.306			3-10 4673	
		6	40	Рукав А 25 Ø 9 l=600	гот. изд.	2	0.2	0.4				ГОСТ 1330-55
		12	39	Рукав А 25 Ø 9 l=700	гот. изд.	4	0.3	1.2				ГОСТ 1330-55