

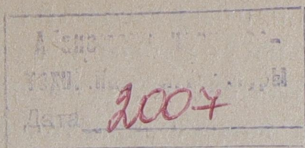
21-36/7
А 84
Ленинградский Институт Инженеров Путей Сообщения

Проф. В. В. АРНОЛЬД

КИНЕМАТИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ
РАБОЧЕГО
МЕХАНИЗМА
ОДНОКОВШЕВОГО ЭКСКАВАТОРА

Отдельный оттиск из Сборника Института — вып. 101

ЛЕНИНГРАД
1929



Кинематический анализ рабочего механизма одноковшевого экскаватора.

(Из области новых идей современного американского экскаваторостроения).

573172

Современные машиностроительные заводы, избравшие своею специальностью экскаваторостроение, идя навстречу широко растущим требованиям все глубже и глубже механизуемого современного строительного дела, выпускают на рынок, — преимущественно американский и, отчасти, германский, — весьма большое количество крайне разнообразных механических снарядов, предназначенных для различных работ по разработке грунта. Совершенно понятно, что эта именно отрасль строительного дела, обладающая полностью всеми особенностями, свойственными всякому массовому производству, представляет собою особенно благоприятствующую применению машинной работы область, так как экономичность всякой механизации, как известно, в значительной мере зависит от степени обеспечения избранного механического снаряда надлежащим количеством работы, т. е. от степени загрузки строительной машины.

Предлагаемые строительству современным рынком экскаваторы, как указано выше, чрезвычайно разнообразны; они отличаются друг от друга как по роду потребляемой ими энергии, т. е. по характеру их силового оборудования (экскаваторы паровые, газолиновые, электрические, электро-газолиновые, пневматические и т. п.), так и по конструкции их ходового оборудования (экскаваторы на колесном ходу, на железнодорожном ходу, на гусеничном ходу, на шагающем ходу и т. п.) и их рабочего оборудования (многоковшевые цепные экскаваторы, одночерпаковые стреловые экскаваторы, колесные экскаваторы и т. п.).¹ Понятно, что столь настойчиво проводимый в этой области процесс дифференциации типов снаряда, т. е. процесс углубления специализации различных машин, всецело базируется на стремлении возможно ближе приспособить механический снаряд к специальным условиям его работы и тем самым возможно более снизить себестоимость единицы его полезной работы.

¹ См. работу автора: Проф. В. В. Арнольд. Машина в строительном деле. Том I.

Очевидно, что наиболее существенным признаком, характеризующим основные отличия этих весьма разнообразных типов, является тип конструкции его рабочего оборудования, обслуживающего движения и работу его исполнительного органа, т.-е. ковша. Что же касается отличий в характере силового и ходового оборудования, то,—несмотря на весьма важное практическое значение этих отличий с точки зрения успешности и экономичности работы этой машины,—отличия эти скорее характеризуют не сам экскаватор, как механизм или машину, а те условия, в которых ему придется работать; вполне очевидно, что на выбор силового оборудования решающее влияние оказывают местные цены на топливо и энергию, а на выбор типа ходового оборудования общие условия рельефа и дорог той местности, где экскаватору придется работать.

Остановившись, поэтому, на рабочем оборудовании, нужно, прежде всего, провести резкую грань между двумя существенно различными его типами: многоковшевым экскаватором (buckets guide frame dredger), орудием которого является бесконечная ковшевая цепь, снабженная рядом (24—40) небольших ковшей, вместимостью от 0,05 до 0,4 куб. м каждый, и одноковшевым экскаватором (power shovel, ditcher, skimmer и т. п.), исполнительным органом которого является один ковш, вместимостью от 0,38 до 6,00 (и даже больше) куб. м.¹ В последнем типе наиболее распространена конструкция одноковшевого экскаватора с поворотной стрелой, в котором ковш тем или иным способом прикреплен к установленной на поворотной платформе стреле.²

Предметом настоящей заметки является рассмотрение того основного пути, по которому шло за последнее время развитие конструктивной мысли при совершенствовании схем и типов рабочего оборудования одноковшевых экскаваторов и выявление той основной идеи, которой следовала эволюция этих типов и которая, предопределив последние конструкции этого оборудования, может дать некоторые предположительные указания и на дальнейший ход этой эволюции. Следует при этом оговорить, что в настоящей заметке рассматривается вопрос о развитии форм рабочего оборудования исключительно жесткого типа, т.-е. такого, где основная связь исполнительного органа (ковша) и станины (опорной рамы) машины осуществляется при помощи жестких звеньев (экскаваторы типа power shovel, ditcher, skimmer и т. п.), а не при помощи гибкого звена, т.-е. при помощи подвешенного ковша (экскаваторы типа drag-line, clamshell, orange peel и т. п.).

¹ Оба эти типа машин в современных наиболее тяжелых моделях достигают исключительной производительности; фактическая производительность крупных многоковшевых экскаваторов *C. G. Irwin* а превышала в среднем грунте 700 куб. м/час, а фактическая производительность одноковшевых экскаваторов *Marion* а в средних условиях достигала 360 куб. м/час. Интересно отметить, что американская практика определенно предпочитает одноковшевый тип.

² К этому типу относится более 80% работающих в Америке одноковшевых экскаваторов.

В большинстве стреловых одноковшевых экскаваторов прямой (рабочий) ход ковша может быть расчленен на три последовательных, но отчасти перекрывающих друг друга движения: 1) напорное движение (врезание в грунт), 2) подъемное движение (подъем кверху) и 3) поворотное движение (вращение около вертикальной оси, для установки над местом отвала). Совокупность этих движений образует первую половину полного цикла ковша (рабочий ход). Повторение этих движений, после автоматической разгрузки над местом отвала, в обратной их последовательности составляет вторую половину полного цикла ковша (порожний ход). Очевидно, что после полного цикла ковш возвращается в исходное свое положение и что производительность цикла равна фактической загрузке ковша.¹

Так как порожний ход повторяет в обратном порядке различные фазы рабочего хода, то для характеристики рабочего оборудования достаточно изучить механизм прямого (рабочего) хода ковша. Так как поворотное движение во всех без исключения типах осуществляется вращением около вертикальной оси всего рабочего оборудования на горизонтальной поворотной платформе, вращающейся около своего центра по отношению к опорной раме (станине) машины, то при сравнении различных типов рабочего оборудования поворотный механизм, как одинаковый во всех типах, можно из рассмотрения исключить, ограничившись изучением эволюции напорного и подъемного механизма прямого (рабочего) хода ковша. Имея в виду, что как напор, так и подъем осуществляются движением ковша в вертикальной плоскости (которая, впрочем, в конце подъемного движения начинает уже вращаться около вертикальной оси поворотного круга), мы видим, что изучение механизма рабочего оборудования можно свести к изучению лежащего в вертикальной плоскости плоского механизма напорного и подъемного движения прямого (рабочего) хода ковша, который в дальнейшем мы будем называть главным механизмом экскаватора.

Станиною главного механизма одноковшевого стрелового экскаватора является поворотная платформа и исполнительным органом рукоять, составляющая одно целое с ковшем. Промежуточным жестким органом, связующим станину и рукоять в определенный механизм, служит стрела. Таким образом, плоский главный механизм экскаватора рассматриваемого типа состоит из трех основных жестких и, в общем случае, подвижно соединенных между собою элементов: 1) станины, 2) стрелы и 3) рукояти с ковшем.

Эти три элемента последовательно связаны двумя кинематическими парами: 1) пара I/II (станина и стрела) и 2) пара II/III (стрела и рукоять).

Так как напорное движение должно быть независимо от подъемного движения и притом каждое из этих движений должно быть,

¹ Период полного цикла в современных машинах колеблется от $\frac{1}{2}$ до $1\frac{1}{2}$ мин.

очевидно, определенно (т.-е. быть принужденным движением заданной траектории), то исполнительный орган (лезвие ковша) должен иметь независимую и определенную подвижность в двух направлениях, т.-е. обладать относительно станины, в конечном счете, двумя степенями свободы. Эти две степени свободы должны быть осуществлены указанными выше двумя кинематическими парами I/II и II/III, откуда непосредственно следует:

1) или, что одна из этих пар является парой с двумя степенями свободы (пара двойкой подвижности), а другая из этих пар вообще отсутствует, т.-е. заменена жесткой связью, неизменно соединяющей два элемента в одно,

2) или, что каждая из этих пар является парой с одной степенью свободы (пара одиночной подвижности или определенная пара принужденного движения).

Имея в виду, что мы имеем дело с силовой машиной, в сочленениях которой, т.-е. в центрах пар I/II и II/III, могут проявляться очень большие усилия, представляется целесообразным, с чисто конструктивной точки зрения, применять для этих пар, в целях уменьшения их изнашиваемости, преимущественно низшие пары, т.-е. такие пары, в которых соприкосновение трущихся поверхностей производится по участкам поверхностей, а не по точкам или линиям. Исключая, по очевидным соображениям, из числа возможных для данного случая низших пар пару винтовую, мы должны ограничить конструктивные решения рассматриваемой задачи применением двух низших определенных пар: вращательной пары и призматической пары.

Располагая, таким образом, двумя видами пар (вращательной парой и призматической парой), можно для поставленной выше задачи создания механизма с двумя степенями свободы получить, при наличии в механизме трех элементов, теоретически говоря, шесть различных решений, сгруппированных в первом столбце нижеприведенной таблицы I.

Во всякой призматической паре один из элементов играет роль призмы, а другой роль призматической муфты; ось муфты, очевидно, определяет собою направление оси призматической пары. Поэтому каждая призматическая пара может быть сконструирована, в сущности, в двух видах, в зависимости от того, первому или второму из элементов этой пары поручается роль муфты, т.-е. смотря по тому, совпадает ли ось пары с первым или вторым элементом ее. При этих условиях, каждая из приведенных выше схем, содержащая призматическую пару, может быть представлена в виде двух кинематических тождественных, но конструктивно различных схем: так, например, схема № 1, в которой муфтой призматической пары II/III является элемент II (стрела), т.-е. перемещение рукояти осуществляется сдвижением ее вдоль оси рукояти, может быть, без изменения ее кинематического

смысла, преобразована в схему № 1^а, в которой муфтой призматической пары II/III явится элемент III (рукоять), т.е. перемещение рукояти будет осуществляться параллельным сдвижением ее вдоль оси стрелы, общее число различных конструктивных

ТАБЛИЦА 1.

СХЕМА				пара I/II	пара II/III
1		1 ^а		жесткое соединение	вращат. призмат. пара (двойкой подвижности)
2		2 ^а		вращат. призмат. пара (двойкой подвижности)	жесткое соединение
3		—	—	вращат. пара	вращат. пара
4		4 ^а		вращат. пара	призмат. пара
5		5 ^а		призмат. пара	призмат. пара
6		6 ^а		призмат. пара	вращат. пара

Примечание: Призматическая пара ● Вращательная пара
 Вращ.-призм. п.

схем, удовлетворяющих нашему заданию, будет равно одиннадцати. Все эти схемы помещены в таблице 1.

В любой из намеченных выше одиннадцати схем последнее звено (рукоять) обладает относительно первого звена (станины) двойкой подвижностью, т.е. при неизменном положении первого звена имеет, как на это указывалось выше, две степени свободы. Следовательно, для управления движением рукояти необходимо во всех намеченных выше одиннадцати схемах два привода: в большинстве осуществляемых на практике примерах привод этот осуществляется при помощи каната (подъемного или тягового), наматываемого на установленный на станине барабан (подъемный или тяговой) главной машины экска-

ватора. В подлежащих случаях, в зависимости от направления тяги, канаты эти приходится проводить через направляющие блоки.

Станина, стрела, рукоять, канаты, блоки и барабаны образуют, в своей совокупности, замкнутый многозвенный сложный плоский механизм, являющийся тем самым механизмом рабочего оборудования, который подлежит нашему рассмотрению.

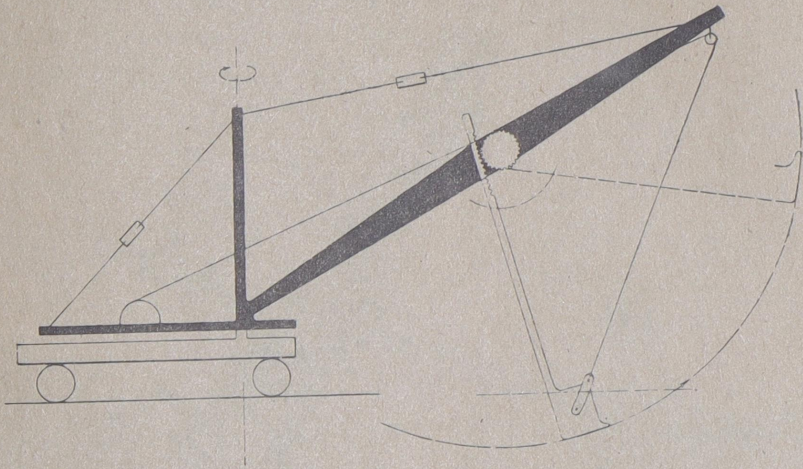
Одним из наиболее пригодных в данном случае приемов изучения механизма является способ, основанный на теории кинематических цепей.¹ Прием этот, введенный в свое время в прикладную механику Releaux и всесторонне и блестяще развитый его школою, страдает, впрочем, некоторой односторонностью: имея дело, главным образом, с кинематическими соотношениями, т.-е. рассматривая, преимущественно, характер движений, метод этот оставляет в стороне или, во всяком случае, весьма мало освещает крайне важную в силовых машинах динамическую сторону явления, т.-е. почти не принимает во внимание характера сил. Это обстоятельство, без сомнения, и явилось основною причиною постепенного ослабления того несомненного увлечения,² с которым были первоначально встречены глубоко продуманные работы школы Releaux. Однако, метод кинематических цепей, с наиболее исчерпывающей полнотой и притом в крайне простой форме, выясняет основные кинематические свойства механизмов и, что особенно ценно в рассматриваемом случае, служит чрезвычайно действительным средством к выявлению часто глубоко скрытого сходства и различия между отдельными механизмами. Благодаря этому, в тех случаях, где речь идет об установлении степени родства между отдельными механизмами (анализ механизма), метод кинематических цепей является незаменимым и в некоторых отношениях прямо единственным. Другим весьма ценным свойством этого метода является та исчерпывающая полнота, с которой, оперируя этим методом, можно установить схемы всех тех механизмов, которые удовлетворяют тому или другому заданию; другими словами, метод этот дает исчерпывающие и иногда совершенно неожиданные указания в исканиях конструктора на пути творческого создания им новых механизмов (синтез механизма), удовлетворяющих постановленной перед ним задаче.

Так как поставленная нами цель заключается в уяснении сходства и различия между различными механизмами рабочего оборудования разных типов современного экскаваторостроения и в выявлении того пути, по которому идет в этом деле эволюция этих механизмов,—то метод кинематических цепей, очевидно, в этом именно направлении и может дать наиболее надежные для исследования результаты.

¹ См. Проф. В. В. Арнольд, „Основы учения о машинах“. 1925.

² На которое, между прочим, совершенно справедливо указывает Lorentz в своей работе *Technische Mechanik starrer Systeme*. Глава VII.

Этот метод, как известно, состоит в том, что, расчлняя данный механизм на последовательный ряд составляющих его подвижных элементов и анализируя характер и степень подвижности связи этих элементов, т.-е. характер входящих в механизм кинематических пар, рассматривают данный механизм, как многозвенную кинематическую цепь, поставленную на то из своих звеньев, которое соответствует неподвижному его элементу, т.-е. станине. Очевидно, что во всяком механизме все его элементы, прямо или посредством других элементов, связаны тем или иным способом со станиной, которая, таким образом является во всех законченных механизмах замыкающим звеном, т.-е. всякий законченный механизм представляет собою за м-



Черт. 1. Схема механизма рабочего оборудования механической лопаты.

кнутую кинематическую цепь, часть же механизма может сводиться и к открытой кинематической цепи.

С этой точки зрения показанные выше (табл. I) схемы различных механизмов рабочего оборудования, включающие в себя только станину, стрелу и рукоять, т.-е. являющиеся лишь частями механизма, представляют собою, очевидно, трехзвенную открытую цепь (с двумя парами); часть эта превратится в законченный механизм только в том случае, если мы введем в состав механизма, кроме станины, стрелы и рукояти, еще какой-либо другой элемент, например, канат (или, вообще говоря, какие-либо другие звенья), в результате чего мы и получим соответствующую всему механизму четырехзвенную или, вообще говоря, многозвенную замкнутую цепь со многими парами.

Стоящая перед нами задача сводится к разрешению следующих вопросов:

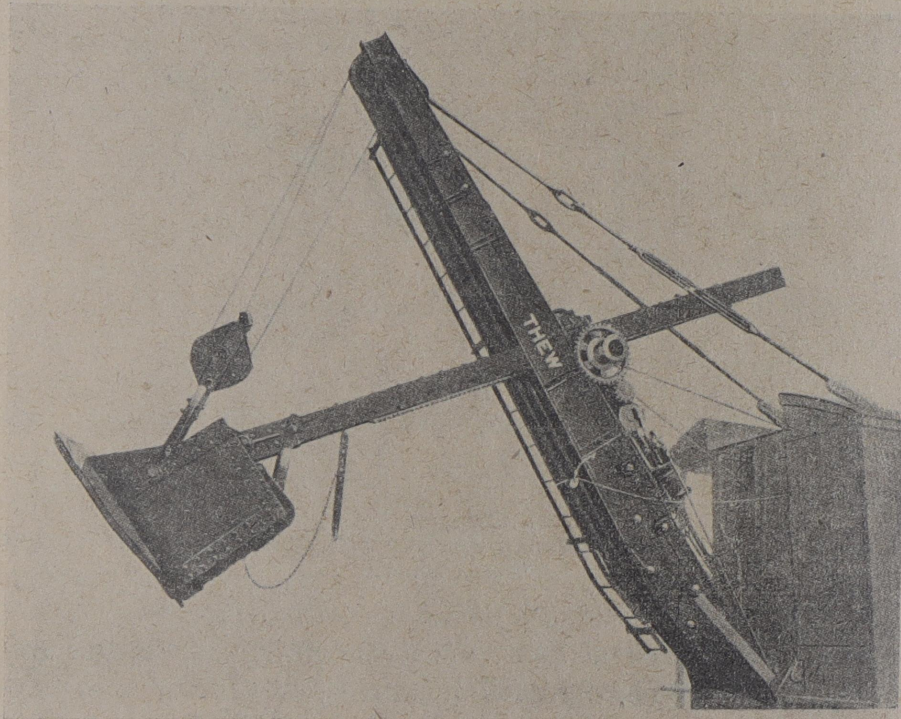
1. Каким именно из перечисленных в табл. I возможных кинематических схем (открытых трехзвенных кинематических цепей) отвечают схемы рабочего оборудования существующих современных экскаваторов.

2. Какие производственные и конструктивные причины лежали в основе эволюции схем рабочего оборудования, приведшей, в конечном результате, к схемам последних типов этого оборудования.

3. Какие пути этой эволюции можно предвидеть в ближайшем будущем.

Первым по времени своего появления типом одноковшевого экскаватора с жесткими звеньями был тип экскаватора (черт. 1), носящего название механической лопаты (power shovel).

Стрела (черт. 2) механической лопаты неизменно соединена с поворотным кругом (станиной), а рукоять с ковшем может: 1) вращаться



Черт. 2. Механизм рабочего оборудования механической лопаты.

при помощи подъемного каната около точки пересечения своей оси с осью стрелы (подъемная машина) и 2) сдвигаться вдоль своей оси при помощи кремальерной трансмиссии (напорная машина).

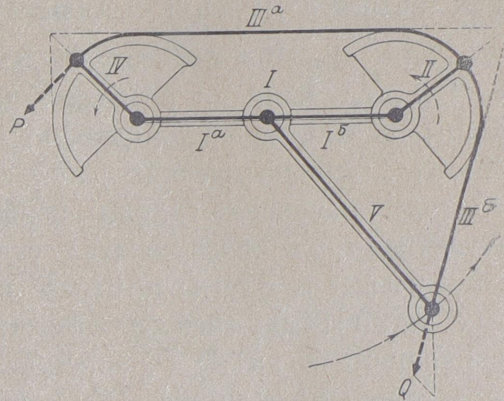
Рассмотрим, с точки зрения теории кинематических цепей, в отдельности механизм для вращения рукояти (подъемное движение) и механизм для одновременного вращения и продвижения рукояти (подъемное и напорное движение).

1. Механизм для вращения рукояти.

Механизм для вращения рукояти (черт. 2) представляет собою замкнутую пятизвенную кинематическую цепь (черт. 3) с гибким элементом (звено III—подъемный канат) и с силовым замы-

канием, состоящую из пяти звеньев (I — станина со стрелой, II — блок на ноке стрелы, III — подъемный канат, IV — подъемный барабан и V — рукоять с ковшем), связанные между собою шестью кинематическими парами, из которых четыре пары вращения (I/II — стрела и блок, I/III — станина и барабан, I/V — стрела и рукоять и V/III — рукоять и канат) и две пары катания (II/III — блок и канат и IV/III) — барабан и канат).

Так как эта пятизвенная цепь может быть геометрически разложена на две цепи, имеющие между собою ряд общих элементов, а именно на две четырехзвенные цепи I—II—III^a—IV и I^b—II—III^b—V, имеющие три общих звена I (часть станины), II (блок) и III (канат), — то рассматриваемая цепь относится к категории составных кинематических цепей.



Черт. 3. Замкнутая кинематическая цепь механизма для вращения рукояти механической лопаты.

Так как в состав этой пятизвенной цепи входят несколько звеньев, непосредственно соприкасающихся с более чем двумя соседними элементами, а именно: звено I (станина со стрелой), соприкасающиеся с тремя примыкающими к нему звеньями II (блок), III (барабан) и V (рукоять) и звено III (подъемный канат) соприкасающийся со звеньями V (рукоять), II (блок) и IV (барабан), — рассматриваемая составная кинематическая цепь относится к типу сложных кинематических цепей.

С точки зрения характера замыкания входящих в эту цепь кинематических пар, рассматриваемую цепь надо отнести к разряду кинематических цепей с силовым замыканием, так как в число ее звеньев входит звено III (канат), которое, будучи гибким элементом цепи, образует с соседними с ним звеньями V (ковш с рукоятью), II (блок) и IV (барабан) кинематические пары V/III, II/III и IV/III лишь при наличии надлежащего к этим звеньям прижатия действием какой-либо внешней силы, что осуществляется растяжением гибкого звена III (каната) приложенными к концам его внешними силами P (тангенциальное усилие на окружности подъемного барабана) и Q (направленная по подъемному канату составляющая веса ковша и части рукояти).

Относительные движения всех жестких звеньев рассматриваемой цепи, допускаемые характером их подвижности относительно общей станины, т.е. движения звеньев II (блок), IV (барабан) и V (рукоять)

относительно звена I (станина со стрелой), осуществляются, при наличии силового замыкания цепи силами P и Q , путем изменения длины входящего в состав цепи гибкого звена III (подъемного каната), т.-е. при помощи выбирания или опускания подъемного каната путем наматывания его на барабан (при $P > Q$) или путем сматывания его с барабана (при $P < Q$). Таким образом, рассматриваемая цепь является цепью с переменным звеном.

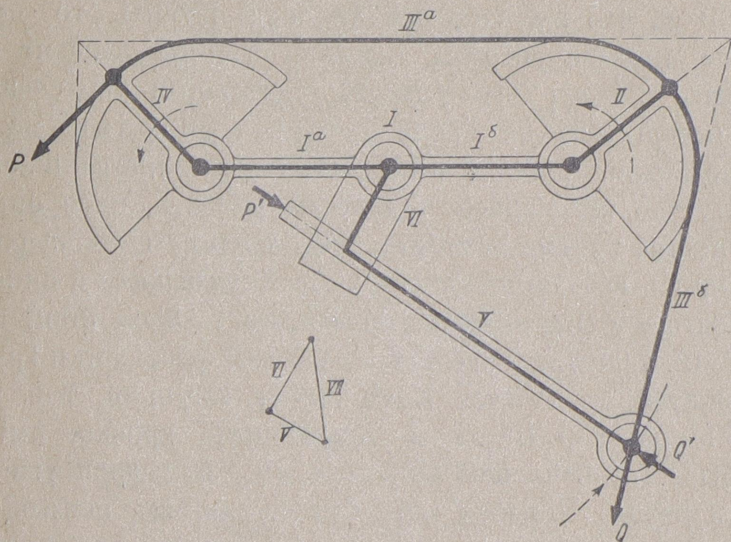
При наличии силового замыкания всей цепи внешними силами P и Q и при наличии в составе цепи звена III (канат) переменной длины, рассматриваемая цепь может быть отнесена к числу определенных кинематических цепей (или цепей принужденного движения), так как изменение длины переменного звена III (выбирание или опускание подъемного каната), однозначно связано с вполне определенным и единственно возможным движением остальных подвижных звеньев относительно общей станины всей цепи: вращением звена II (вращение блока на ноке стрелы около своей оси), вращением звена IV (вращение подъемного барабана около своей оси) и вращением звена V (вращение рукояти около стрелы).

Таким образом, механизм для вращения рукояти, с кинематической точки зрения, представляет собою пятизвенную составную сложную определенную плоскую кинематическую цепь с силовым замыканием гибкого звена переменной длины с четырьмя парами вращения и двумя парами катания.

2. Механизм для одновременного вращения и продвижения рукояти.

Механизм для одновременного вращения и продвижения рукояти (черт. 4) отличается от механизма для вращения рукояти, с кинематической точки зрения, тем, что в рассмотренную выше пятизвенную цепь вводится: А) между звеном I (стрела) и V (рукоять) новое звено VI (поворотная шайба), соединенное со звеном I (стрелой) вращательной парой I/VI, а со звеном V (рукоятью) призматической парой V/VI, т.-е. парой поступательного движения, и Б) добавочное боковое звено VII (шестеренка вала двигателя), соединенное со звеном VI (поворотная шайба) вращательной парой VII/VI со звеном V (рукоятью) парой зацепления V/VI (кремальерное зацепление). Таким образом, звено V (рукоять), будучи связано с звеном VI (поворотной шайбой) парой поступательного движения, получает характер твердого звена переменной длины, длина которого зависит от взаимодействия двух внешних сил P' (усилия на ведущей шестеренке напорного двигателя) и Q' (направленного по оси рукояти сопротивления грунта напорному врезыванию в грунт).

При этих условиях, благодаря наличию двух звеньев переменной длины, механизм для одновременного вращения и продвижения рукояти перестает быть определенной кинематической цепью, обуславливающей только одну степень свободы ковша (центр пары V/III), но становится неопределенной кинематической цепью, позволяющей орудью, т.е. ковшу (центр пары V/III) иметь две степени свободы: одну в направлении вращения рукояти вместе с поворотной шайбой около стрелы (подъемное движение) и вторую в направлении продвижения оси рукояти в поворотной шайбе (напорное



Черт. 4. Замкнутая кинематическая цепь для одновременного вращения и продвижения рукояти механической лопаты.

движение). Таким образом, траектория движения ковша перестает быть окружностью, но становится неопределенной плоской кривой, характер которой зависит как от соотношения сил P и Q (подъем), так и от соотношения сил P' и Q' (напор).

В виду изложенного, механизм для одновременного вращения и продвижения рукояти, с кинематической точки зрения, представляет собою семизвенную составную сложную неопределенную плоскую кинематическую цепь с силовым замыканием и с двумя звеньями переменной длины с пятью парами вращения, двумя парами катания, одной парой зацепления и одной призматической парой.

Проделанный нами подробный анализ механизма рабочего оборудования механической лопаты показывает, что механизм этот построен по схеме № 1 основной таблицы I.

Тип этот (механическая лопата) не только был первым по времени своего появления, но и остался наиболее распространенным типом одноковшевого экскаватора до настоящего времени.¹

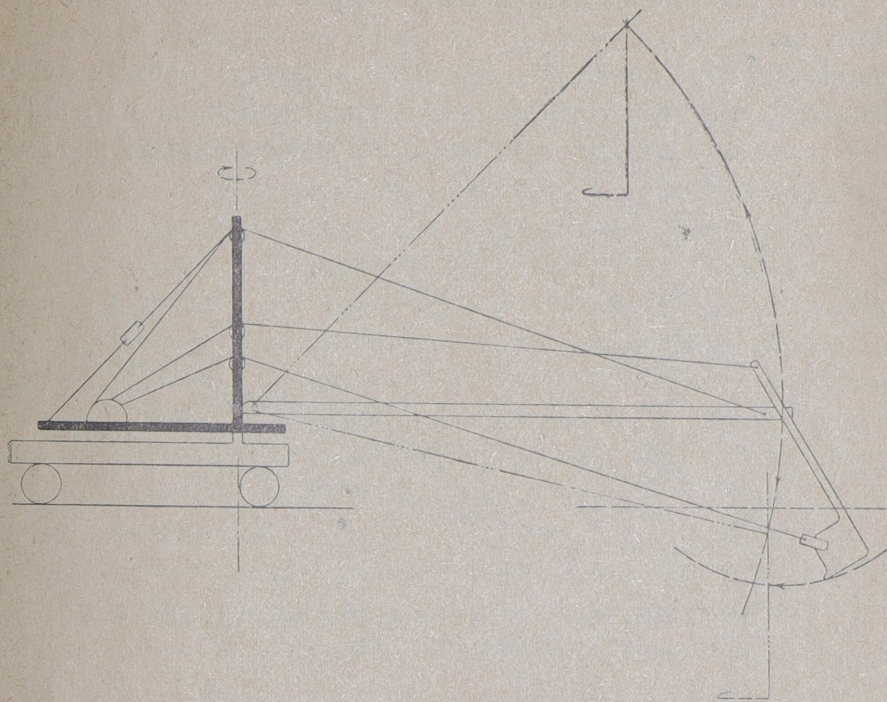
Легко видеть, что рассмотренный нами механизм рабочего оборудования механической лопаты, позволяя лопате работать при сравнительно больших радиусах действия и высотах отвала, ограничивает ее работу весьма небольшою глубиною по отношению к тому уровню, на котором стоит экскаватор. Действительно, радиус действия и высота отвала зависят главным образом, от длины стрелы и от постоянного угла ее подъема: при длинных стрелах современных тяжелых экскаваторов радиус работы достигает до 30 м и высота отвала до 20 м; что же касается глубины работы, то при данных длине и угле подъема стрелы, глубина работы зависит от длины рукояти. Имея в виду, что рукоять, испытывая на себе напорное давление, подвергается во время напора продольному изгибу и, будучи подвижной частью, не может быть сделана слишком тяжелою, легко видеть, что чрезмерное удлинение рукояти, имея определенные пределы, является крайне нежелательным; поэтому глубина работы механической лопаты, вообще говоря, очень незначительная и лишь в редких случаях превышает 2 м под тем уровнем, на котором стоит экскаватор.

При таких условиях, для более глубокой разработки грунта механической лопатой приходится вести работу уступами, т.-е. постепенно переводить экскаватор на более пониженные уровни, им же самим разработанные. Так как такой прием работы, не говоря уже о вредных перерывах в работе во время передвижки машины, неизбежно связанных с ним, не всегда осуществим (например, при рытье узких и глубоких канав машина, очевидно, не может быть опущена на дно), то одним из первых требований, которые производитель мог предъявить конструктору, было требование на такое изменение конструкции, которое позволило бы экскаватору увеличить глубину своей работы.

Совершенно ясно, что указанная выше особенность работы механической лопаты, т.-е. сравнительно малая глубина ее работы, является прямым следствием высокого места подвеса рукояти на стреле (примерно, посередине стрелы) и сравнительно большого и неизменного угла подъема этой стрелы (до 45° — 55° к горизонту). Естественно, поэтому, что конструктор, идя навстречу этому требованию производителя, должен был допустить вращение стрелы в вертикальной плоскости около ее горизонтального опорного шарнира (чтобы опускать стрелу при работе и поднимать ее при отвале) и, следуя далее по тому же пути, перенести точку подвеса рукояти от середины стрелы к ее голове (чтобы при опущенной стреле еще больше увеличить глубину работы). Желая при этом сохранить за собой,

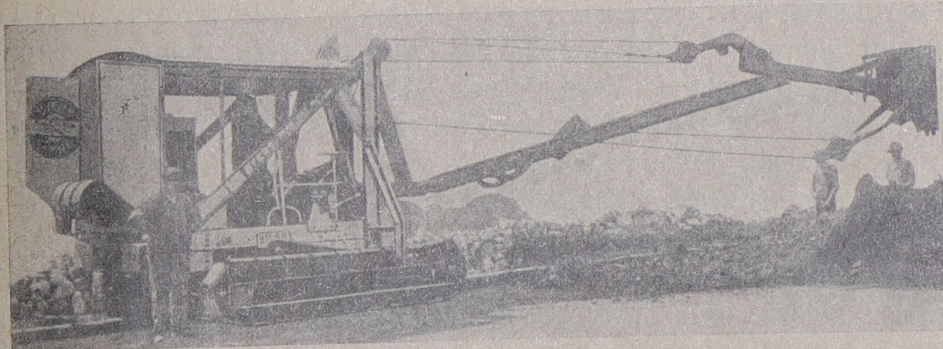
¹ В современных типах механической лопаты, рабочий вес всего снаряда колеблется в пределах 14—450 т, объем ковша от 0,38 куб. м до 6,12 куб. м и часовая производительность при средних условиях от 15—360 куб. м вынутого грунта в час.

ведущей ковш, характер силы подтягивающей (а не проталкивающей) ковш, конструктор должен был изменить направление вращения рукояти на обратное, двигая ковш, во время рабочего хода, к машине, а не



Черт. 5. Схема механизма рабочего оборудования скрепкового канавкопателя.

от нее, как это было возможно до тех пор, пока ось вращения рукояти не оказалась на самом конце (голове) стрелы.



Черт. 6. Скрепковый канавкопатель.

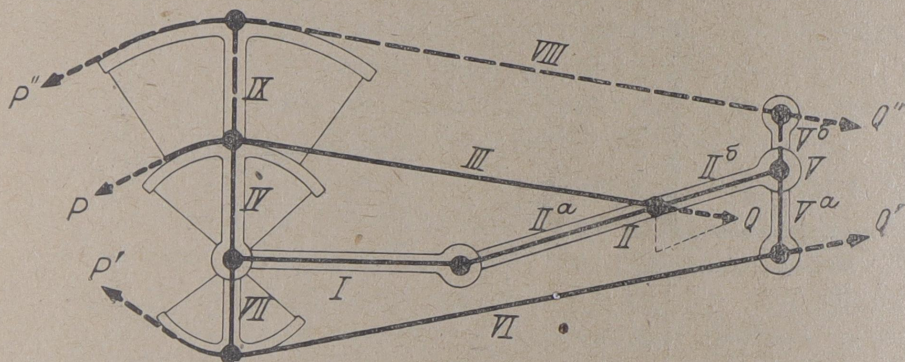
Таким изменением конструкции механической лопаты был получен второй тип экскаватора с жесткими звеньями (черт. 5), получивший название скрепкового канавкопателя (ditcher).

Стрела (черт. 6) скрепкового канавкопателя или дичера вращается в вертикальной плоскости около своего пятового шарнира, а рукоять вращается в той же плоскости около головного шарнира стрелы.

Рассмотрим механизм рабочего оборудования дитчера с точки зрения теории кинематических цепей.

В конструкции рабочего оборудования дитчера прямой (рабочий) и обратный (порожний) ходы ковша осуществляются двумя отдельными механизмами.

А) Механизм прямого (рабочего) хода представляет собою замкнутую семизвенную кинематическую цепь (черт. 7) с двумя гибкими элементами (звено III — подъемный канат стрелы



Черт. 7. Замкнутая кинематическая цепь механизма рабочего оборудования дитчера.

и звено VI — тяговой канат ковша) и с двойным силовым замыканием, состоящую из семи звеньев (I — станина, II — подъемная стрела, III — подъемный канат стрелы, IV — подъемный барабан, V — рукоять с ковшем, VI — тяговой канат ковша и VII — тяговой барабан), связанных между собою восемью кинематическими парами, из которых шесть пар вращения (I/II — станина и стрела, II/III — стрела и подъемный канат, I/IV — станина и подъемный барабан, II/V — стрела и рукоять, V/VI — рукоять и тяговой канат и I/VII — станина и тяговой барабан) и две пары катания (IV/III — подъемный барабан и подъемный канат и VII/VI — тяговой барабан и тяговой канат).

Так как эта семизвенная цепь может быть разложена на две кинематические цепи: четырехзвенную цепь I—II^a—III—IV (механизм подъема или опускания стрелы) и пятизвенную цепь I—II—V^a—VI—VII (механизм подтягивания ковша), имеющие два общих звена I (станина) и II^a (часть стрелы), — то рассматриваемая цепь относится к числу составных кинематических цепей. Так как одно из звеньев этой семизвенной цепи, а именно звено II (стрела), непосредственно соприкасается с тремя соседними элементами, а именно, со звеньями I (станина), III (подъемный канат) и V (рукоять), — то рассматриваемая составная кинематическая цепь относится к типу сложных кинематических цепей.

Наличие двух гибких звеньев III (подъемный канат) и VI (тяговой канат), образующих кинематические пары с соседними звеньями лишь

при прижатии их к этим звеньям внешними силами, заставляет отнести рассматриваемую цепь к категории цепей с двойным силовым замыканием, осуществляемым для звена III взаимодействием сил P (тангенциальное усилие на окружности подъемного барабана) и Q (направленная по подъемному канату составляющая веса части стрелы, рукояти и ковша) и для звена VI взаимодействием сил P' (тангенциальное усилие на окружности тягового барабана) и Q' (направленная по тяговому канату сила противодействия грунта).

Относительное движение жестких звеньев рассматриваемой цепи осуществляется путем изменения длин входящих в состав этой цепи гибких звеньев III (подъемного каната) и VI (тягового каната), т.-е. при помощи выгибания (при $P > Q$) или отпускания (при $P < Q$) подъемного каната путем наматывания или сматывания его с подъемного барабана и при помощи выгибания (при $P' > Q'$, что отвечает рабочему, т.-е. прямому ходу механизма) тягового каната путем наматывания его на тяговой барабан. Таким образом, рассматриваемая семизвенная кинематическая цепь является цепью с двумя переменными звеньями.

Каждая из двух кинематических цепей, на которые разлагается рассматриваемая составная семизвенная цепь, т.-е. как четырехзвенная цепь I—II^a—III—IV (механизм подъема или опускания стрелы), так и пятизвенная цепь I—II—V^a—VI—VII (механизм подтягивания ковша), относятся к числу определенных цепей: действительно, изменение длины переменного звена III (работа подъемного каната) однозначно связано с вращением звена II (стрелы) около звена I (станины), а изменение длины переменного звена VI (работа тягового каната) с вращением звена V (рукояти) около звена II (стрелы). Но соединение этих двух цепей в общую составную семизвенную цепь (механизм одновременного подъема или опускания стрелы и подтягивания ковша), т.-е. одновременное изменение длин обоих переменных звеньев III (подъемный канат) и VI (тяговой канат), лишает составную семизвенную цепь определенности и позволяет орудью, т.-е. ковше (центр пары V/VI) иметь две степени свободы: одну, в зависимости от изменения уклона стрелы относительно станины (подъемное или опускное движение) и другую, в зависимости от вращения рукояти относительно стрелы (тяговое движение), причем траектория движения ковша, теряя свою определенность, становится в зависимость как от соотношения сил P и Q (подъем или опускание стрелы), так и от соотношения сил P' и Q' (подтягивание ковша).

Таким образом, в дитчере рабочий механизм прямого хода представляет собою, с кинематической точки зрения, семизвенную составную сложную неопределенную плоскую кинематическую цепь с двойным силовым замыканием и с двумя звеньями переменной длины, с пятью парами вращения и двумя парами катания.

Б) Механизм обратного (порожного) хода (черт. 7, пунктир) совершенно тождественен с только-что рассмотренным механизмом прямого (рабочего) хода: четырехзвенная цепь I—II^a—III—IV (механизм подъема или опускания стрелы) остается тем же самым, а пятизвенная цепь I—II—V^a—VI—VII (механизм подтягивания ковша) заменяется кинематически тождественной ей пятизвенной цепью I—II—V^б—VIII—IX (механизм отбрасывания ковша).

Изложенное выше показывает, что механизм рабочего оборудования дитчера построен по схеме № 3 основной таблицы I.

Тип этот (дитчер) оказался, между прочим, особенно удобным для рытья узких и глубоких канав (преимущественно в тяжелых грунтах, где колесные канавокопатели не могут работать даже при небольшой глубине), причем глубина работы достигла значения 6 м, т.-е. оказалась почти втрое больше, чем у механической лопаты; надо, впрочем, оговорить, что увеличение глубины работы было куплено в этом типе за счет значительного уменьшения высоты отвала.¹

Дальнейшее видоизменение этого снаряда было вызвано требованием производителя создать экскаватор, имеющий основную целью планировку площади, а не углубление котлована или канавы; другими словами, ковш должен был строгать, а не рыть грунт. Очевидно, преследуя эту цель, конструктор должен был отказаться от вращения рукояти с ковшем около стрелы (что давало криволинейное очертание рабочей траектории ковша) и заменить его поступательным движением рукояти вдоль стрелы (что дало прямолинейную форму рабочей траектории ковша). При этом, благодаря вращению стрелы в вертикальной плоскости, т.-е. возможности опускания стрелы до самого грунта, отпала надобность в самой рукояти, и конструктор соединил призматической парой ковш непосредственно со стрелой.

Таким изменением конструкции дитчера был получен третий тип экскаватора с жесткими звеньями (черт. 8), получивший название механического струга (skimmer).

Стрела (черт. 9) механического струга, или скиммера, вращается в вертикальной плоскости около своего пятового шарнира, а ковш движется поступательно вдоль стрелы, двигаясь во время прямого (рабочего) хода вперед.

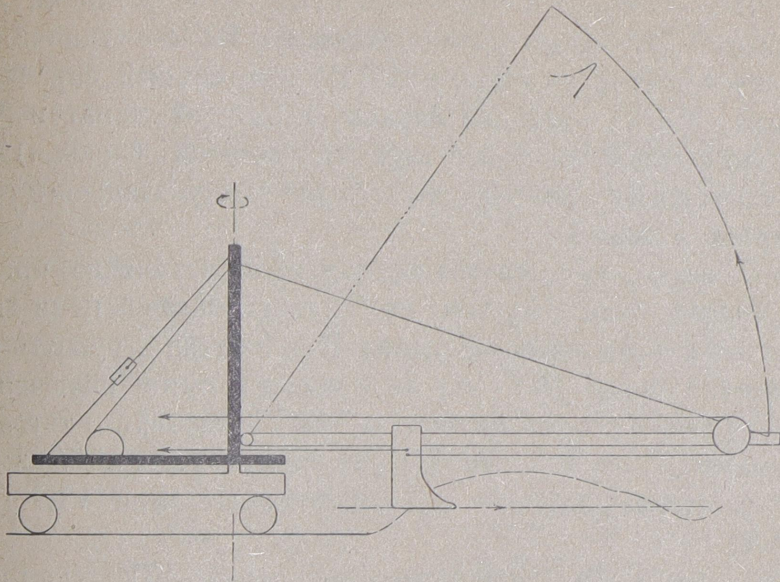
Рассмотрим механизм рабочего оборудования скиммера с точки зрения теории кинематических цепей.

В конструкции скиммера так же, как и в конструкции дитчера, прямой (рабочий) и обратный (порожный) ход ковша осуществляется двумя отдельными механизмами.

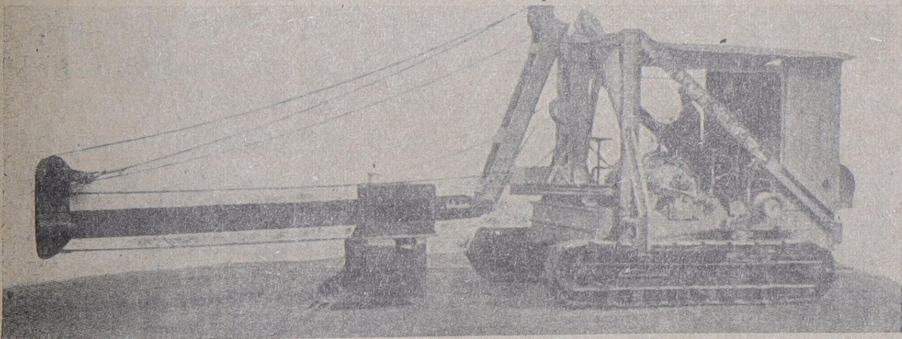
А) Механизм прямого (рабочего) хода скиммера представляет собою замкнутую восьмизвенную кинематическую цепь

¹ В современных моделях скребкового канавокопателя вес всей машины колеблется в пределах 12—18 т, объем ковша около 0,38 куб. м и часовая производительность при средних условиях от 20—40 куб. м вынутаго грунта в час.

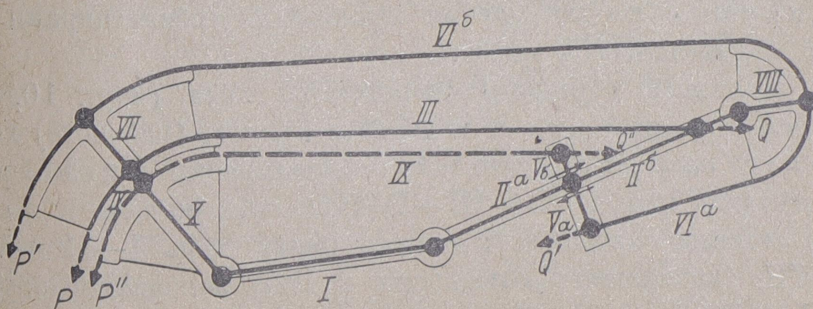
(черт. 10) с двумя гибкими звеньями (звено III—подъемный канат и звено VI—тяговой канат) и с двойным силовым замыканием, со-



Черт. 8. Схема механизма рабочего оборудования механического струга.



Черт. 9. Механический струг.



Черт. 10. Замкнутая кинематическая цепь рабочего оборудования скиммера.

стоящую из восьми звеньев (I—станина, II—стрела, III—подъемный канат стрелы, IV—подъемный барабан, V—ковш, VI—тяговой канат ковша, VII—тяговой барабан и VIII—блок тягового каната

на ноке стрелы), связанных между собою девятью кинематическими парами, из которых пять пар вращения (I/II—станина и стрела, II/III—стрела и подъемный канат, I/IV—станина и подъемный барабан, V/VI—ковш и тяговой канат и I/VII—станина и тяговой барабан), три пары катания (IV/III—подъемный барабан и подъемный канат, VII/VI—тяговой барабан и тяговой канат и VIII/VI—направляющий блок на ноке стрелы и тяговой барабан) и одна призматическая пара, т.е. пара поступательного движения (II/V—стрела и ковш).

Отсюда видно, что кинематическая цепь механизма прямого хода скиммера может быть получена из кинематической цепи механизма дитчера путем замены пары вращения II/V (стрела и рукоять с ковшем) призматической парой II/V (стрела и ковш) и путем включения между парами V/VI (ковш и тяговой канат) и VII/VI (барабан и тяговой канат) дополнительной пары катания VIII/VI (направляющий блок и тяговой канат), т.е. путем включения дополнительного звена VIII (направляющий блок).

Включение этого дополнительного звена VIII (направляющий блок) вызвано, очевидно, необходимостью изменения тягового усилия на ковше из обратного (назад к машине, как это имеет место для рабочего хода в дитчере) на прямой (вперед от машины, как это требуется для рабочего хода в скиммере) и никакого влияния на основной характер цепи не имеет. Замена в паре II/V (стрела и ковш) пары вращения парой поступательного движения в корне меняет характер цепи и служит указанием на основе и принципиальное отличие скиммера от дитчера.

Анализируя рассматриваемый механизм, легко видеть, что в скиммере рабочий механизм прямого хода представляет собою, с кинематической точки зрения, восьмизвенную составную сложную неопределенную плоскую кинематическую цепь с двойным силовым замыканием и с двумя звеньями переменной длины с пятью парами вращения, тремя парами катания и одной призматической парой.

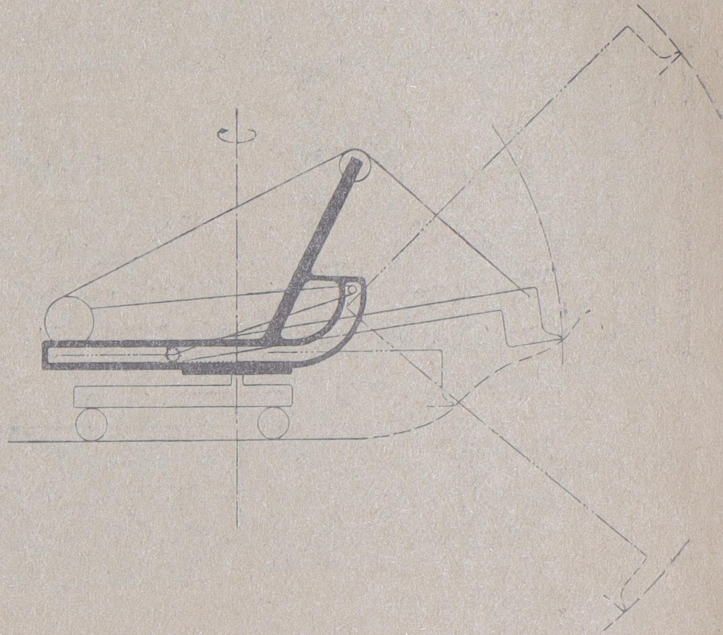
Б) Механизм обратного (порожного) хода (черт. 10, пунктир) отличается от рассмотренного механизма прямого (рабочего) хода лишь тем, что в нем отсутствует звено VIII (направляющий блок на ноке стрелы): четырехзвенная цепь I—II—III—IV (механизм подъема или опускания стрелы) остается прежней, а шестизвенная цепь I—II^a—V^a—VI—VIII—VII (механизм продвижения ковша) заменяется пятизвенной цепью I—II^a—V^b—IX—X (механизм обратного движения ковша).

Приведенный выше анализ показывает, что механизм рабочего оборудования скиммера построен по схеме № 4 основной таблицы I.¹

¹ В современных типах механических стругов вес машины колеблется в пределах 12—20 т., объем ковша около 0,38 куб. м. и часовая производительность при средних условиях 20—38 куб. м вынутаго грунта в час.

Непременною частью каждого из трех рассмотренных выше типов экскаваторов является стрела: было упомянуто, что стрела эта в механической лопате установлена неподвижно под углом $45-55^\circ$ к горизонту, а в дитчере и скиммере может вращаться в вертикальной плоскости около своего пятового шарнира, т.-е. может опускаться или поднимать голову.

В известных условиях работы эта направленная вперед стрела, достигающая иногда (в механических лопатах) очень большой длины, может оказаться затрудняющей и иногда даже исключающей возможность применения экскаватора: такой случай, например, может иметь место при работе в очень тесных условиях. В целях устранения этого неудобства в одном из последних американских экскаваторов с жесткими звеньями конструктор нашел возможным совсем отказаться от неизменной или вращающейся стрелы, заменив ее так называемой телескопической стрелой, способной, в случае надобности, вдвигаться внутрь экскаватора или выдвигаться из него наружу.



Черт. 11. Схема механизма рабочего оборудования экскаватора с телескопической рукоятью.

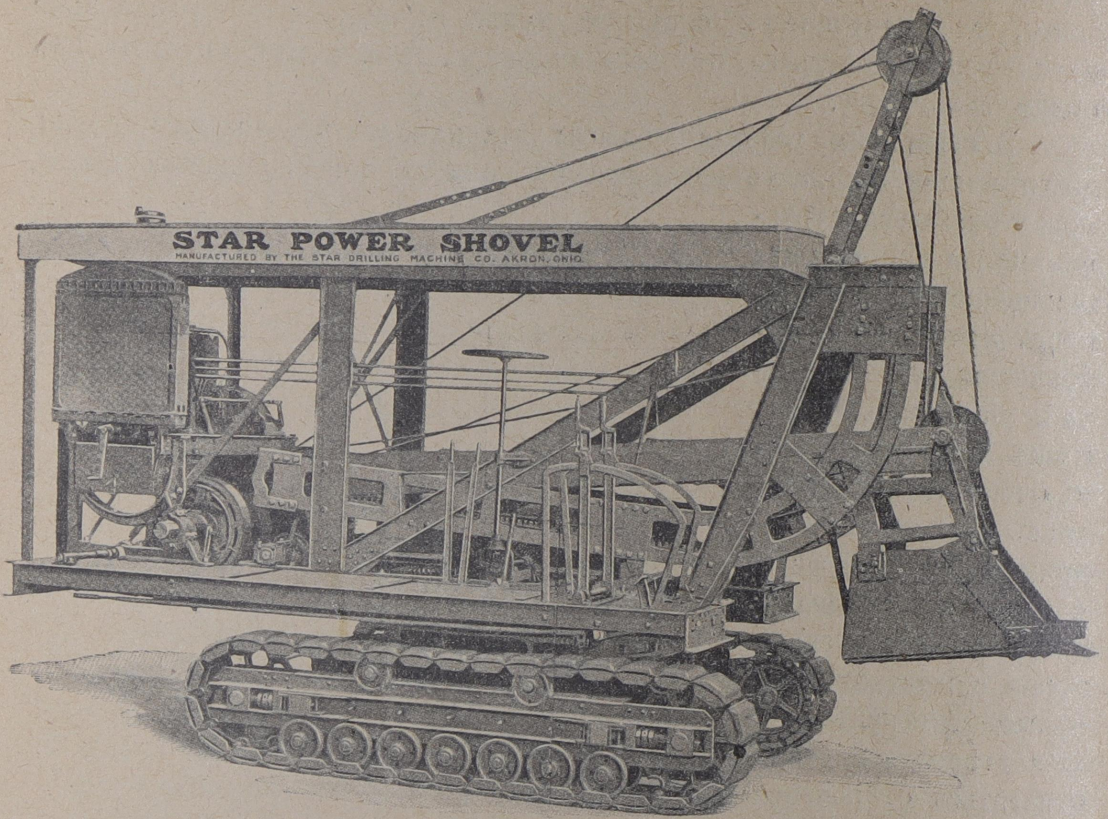
Так как при этом конструктор неподвижно прикрепил к голове этой стрелы ковш, то стрела, в сущности, превратилась в рукоять (boomless excavator), т.-е. данный снаряд получил название экскаватора с телескопической рукоятью и просто телескопического экскаватора (telescopic handle excavator).

Рукоять телескопического экскаватора (черт. 11 и 12) может скользить своею пятою в прорези криволинейной кулисы и в то же время может вращаться около оси своего пятового шарнира. При скольжении пяты рукояти в прорези кулисы, шестеренка ее пятового шарнира катится по зубчатой кремальере кулисы. Продвижение и вращение рукояти осуществляется тяговым и подъемным канатами.

Рассмотрим механизм рабочего оборудования телескопического экскаватора с точки зрения теории кинематических цепей.

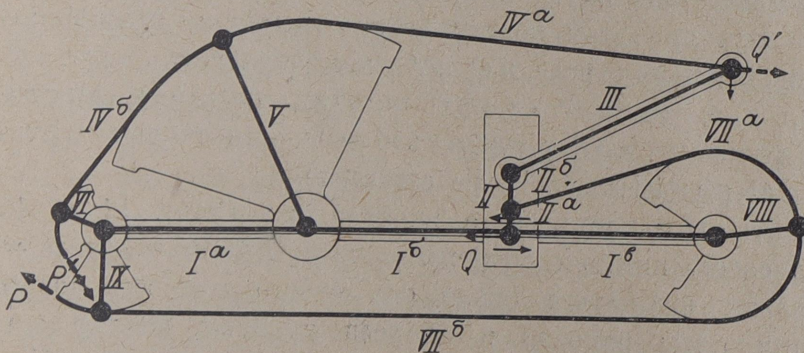
Механизм прямого (рабочего) хода телескопического экскаватора представляет собою замкнутую девятизвенную кинематиче-

скую цепь (черт. 13) с двумя гибкими элементами (звено IV—подъемный канат и звено VII—тяговой канат) и с силовым замыканием,



Черт. 12. Телескопический экскаватор Star Handle Telescope Excavator.

состоящее из девяти звеньев (I—станина, II—ползун, III—стрела с ковшем, IV—подъемный канат, V—верхний направляющий блок



Черт. 13. Замкнутая кинематическая цепь механизма рабочего оборудования телескопического экскаватора.

станины, VI—подъемный барабан, VII—тяговой канат, VIII—передний направляющий блок станины и IX—тяговой барабан), связанных между собою двенадцатью кинематическими парами, из которых

семь пар вращения (II/III—ползун и стрела с ковшем, III/IV—стрела с ковшем и подъемный канат, I/VI—станина и подъемный барабан, I/V—станина и верхний направляющий блок, II/VII—ползун и тяговой канат, I/VIII—станина и передний направляющий блок и I/IX—станина и тяговой барабан), четыре пары катания (V/IV—верхний направляющий блок и подъемный канат, VI/IV—подъемный барабан и подъемный канат, VIII/VII—передний направляющий блок и тяговой канат и IX/VII—тяговой барабан и тяговой канат) и одна призматическая пара, т.е. пара поступательного движения (I/II—станина и стрела с ковшем).

Так как эта девятизвенная цепь может быть геометрически разложена на ряд цепей, имеющих ряд общих звеньев, то рассматриваемая цепь относится к категории составных кинематических цепей. В частности, ее можно разложить на две цепи: шестизвенную цепь I—II—III—IV—V—VI (механизм вращения стрелы около центра пары вращения II/III) и I—II^a—VII—VIII—IX (механизм продвижения стрелы по оси призматической пары I/II), имеющие общие звенья I^a + I^b (часть станины) и II^a (часть ползуна); легко видеть, что каждая из этих составляющих цепей, в свою очередь, является цепью составной. Так как в состав рассматриваемой цепи входит ряд звеньев, соприкасающихся более, чем с двумя соседними звеньями, например, звено I (станина), соприкасающееся с пятью звеньями: II (ползун), V (блок), VI (барабан), VIII (блок) и IX (барабан), звено II (ползун), соприкасающееся с тремя звеньями: I (станина), III (стрела) и VII (тяговой канат) и т. д., то рассматриваемая цепь относится к типу сложных кинематических цепей.

Имея в виду, что оба гибких звена (IV—подъемный канат и VII—тяговой канат) могут образовывать кинематические пары с соседними звеньями (блоками, барабанами и т. п.) лишь при наличии прижатия их к этим звеньям какими-либо внешними силами, рассматриваемую цепь, по числу таких гибких звеньев надо отнести к числу кинематических цепей с двойным силовым замыканием, осуществляемым для звена IV (подъемный канат) взаимодействием сил P' (тангенциальное усилие на окружности подъемного барабана) и Q' (направленная по подъемному канату составляющая веса части стрелы с рукоятью и ковшем (и для звена VII (тяговой канат) взаимодействием сил P (тангенциальное усилие на окружности тягового барабана) и Q (направленная по тяговому канату составляющая сопротивления продвижению стрелы по станине).

Так как относительные движения жестких звеньев механизма осуществляются при помощи изменения длин гибких звеньев IV и VII, осуществляемых при помощи выбирания подъемного и тягового канатов путем наматывания их на соответствующий барабан, то рассматриваемая кинематическая цепь относится к типу кинематических цепей с переменными звеньями.

Очевидно, что наличие двух звеньев переменной длины создает для орудия, т.-е. для центра пары III/IV, возможность двоякого движения: вращения около центра пары II/III (ползун и стрела) и продвижения вместе с звеном II (ползуном) по звену I (станине). При этом условии движение орудия теряет свою определенность и вид траектории его зависит, с одной стороны, от взаимодействия сил P' и Q' (вращение стрелы), а с другой от взаимодействия сил P и Q (продвижение стрелы).

При таких условиях (механизм прямого рабочего) хода телескопического экскаватора с кинематической точки зрения представляет собою девятизвенную составную сложную неопределенную плоскую кинематическую цепь с двойным силовым замыканием, двумя гибкими звеньями переменной длины с семью парами вращения, четырьмя парами катания и одной призматической парой.

Изложенный выше анализ показывает, что механизм рабочего оборудования телескопического экскаватора построен по схеме № 2 основной таблицы I.

Одним из преимуществ такого типа экскаватора является его способность к работе непосредственно вблизи машины и особая его пригодность к работе в тяжелых грунтах.¹

Изложенное выше показывает, что углубляя, под давлением производственных требований, специализацию машины (т.-е. приспособляя ее к различным условиям работы, как-то: глубокому рытью, планировке, работе в тесноте и т. п.), конструктор, ограничиваясь в своей схеме применением пар вращения и поступательного движения, последовательно использовал для схемы механизма рабочего оборудования схемы № 1 (первый вариант—механическая лопата), № 3 (второй вариант—диггер), № 4 (третий вариант—скиммер) и № 2 (четвертый вариант—телескопический экскаватор).

Интересно отметить, что в этих вариантах конструктор последовательно изменял место призматической пары, т.-е. изменял направление скольжения поступательно-движущего элемента механизма: в варианте I скользящий элемент двигался вдоль рукояти; в варианте II конструктор совсем отказался от этого элемента; в варианте III скользящий элемент двигался вдоль стрелы и наконец, в варианте IV элемент этот двигался вдоль станины. Легко видеть, что при этом изменялся и характер этого скольжения: в вариантах I и III мы имели дело со скольжением относительно подвижного элемента (скольжение рукояти относительно поворотной шайбы неподвижной стрелы или скольжение рукояти

¹ Недавно построенная модель телескопического экскаватора Star Grading Shovel (Star Drilling Machine Co) имеет рабочий вес около 17 т, объем ковша 0,57 куб. м (3/4 куб. ярда) и часовую производительность от 50—75 куб. м вынутаго грунта в час. Длина телескопической рукояти 3,94 м и длина телескопического хода (horizontal crowd)—3,35 м (11).

относительно поворотной стрелы), а в варианте IV мы имеем дело со скольжением относительно неподвижного элемента (скольжение пяты телескопической рукоятки относительно станины).

Не трудно при этом видеть, что кинематическая цепь прямого хода рабочего механизма при этой эволюции постепенно усложняется: в варианте I мы имеем 7 звеньев (при 9 парах), в варианте II—7 звеньев (при 8 парах), в варианте III—8 звеньев (при 9 парах) и в варианте IV—9 звеньев (при 12 парах).

Какой же путь может иметь дальнейшая эволюция механизма рабочего оборудования экскаваторов с жесткими звеньями? Или, правильнее сказать, какими возможностями обладает конструктор для удовлетворения предстоящих требований дальнейшего углубления специализации снаряда? Очевидно, что при ограничении свободы выбора пар между основными звеньями (станией, стрелкой и рукояткой) вращательными и призматическими парами все возможные формы различных механизмов рабочего оборудования будут исчерпывающе определяться неиспользованными еще схемами основной таблицы I: таких неиспользованных схем, за вычетом четырех уже осуществленных и рассмотренных выше, имеется, теоретически говоря, семь. Ясно, однако, что далеко не все из этих теоретических возможных схем смогут оказаться практически целесообразными. Решающую роль при оценке практического значения этих схем имеет, разумеется, направление оси призматической пары: направление это, очевидно, отвечает направлению напорного движения, т.-е. направлению резания ковша в грунт. С этой точки зрения наименее целесообразными являются повидимому, те схемы, в которых это направление не может быть изменяемо в соответствии с обстановкой работы, т.-е. в которых совершенно отсутствует вращательная пара, а именно обе схемы № 5 и № 5^а основной таблицы. Учитывая далее те очевидные преимущества, которые имеет с производственной точки зрения, переменный уклон стрелы, позволительно высказать предположение, что те схемы, в которых отсутствует вращательная пара между станией и стрелой, едва ли окажутся практически особо удобными: таковы схемы № 1^а, 6 и 6^а. Что же касается двух остальных схем то схема № 2^а отличается от телескопической лопаты (схемы № 2) лишь направлением оси призматической пары, а схема № 4^а от механической лопаты (схемы № 1) лишь положением вращательной пары. Сравнивая между собою схему № 2^а и схему телескопической лопаты (схема № 2) мы видим, что при горизонтальном положении стрелы обе эти схемы тождественны, а при поднятом положении стрелы сдвигание стрелы в схеме № 2^а ограничено упором стрелы в грунт, а в схеме № 2 может быть, при надлежащей длине кулисы, сделано каким угодно: таким образом схема № 2^а едва ли будет практичнее схемы телескопической лопаты. Сравнивая между собою схему № 4^а и схему механической лопаты (схема № 1), легко видеть, что в схеме № 4^а подъем ковша связан

с вращением и рукояти и стрелы, а в схеме № 1 с вращением только одной рукояти: так как вращать одну рукоять легче и проще, чем вращать рукоять со стрелой, то схема механической лопаты, очевидно, целесообразнее, чем схема № 4^а.

Изложение приводит к заключению, что современными американскими конструкциями, повидимому, исчерпаны все имеющие практическое значение формы механизма рабочего оборудования одноковшевых экскаваторов с жесткою связью между ковшем и станией; можно думать, что дальнейшее развитие новых типов,—в случае возникновения каких-либо специальных потребностей,—пойдет по направлению введения в основную связь ковша со станией гибких звеньев, т.-е. по пути усовершенствования одноковшевых экскаваторов типа drag line, или же по пути использования в механизме рабочего оборудования одноковшевых экскаваторов с жесткою основною связью других, кроме вращательной и призматической, кинематических пар.

Профессор В. В. Арнольд.

Ноябрь 1928 г.

CINEMATIC ANALYSIS OF THE WORKING MECHANISM OF A ONE-BUCKET EXCAVATOR.

(New ideas in modern machine-building in America).

By Prof. V. V. Arnold.

By applying the method of cinematic chains to the study of working mechanisms of modern one-bucket excavators with rigid connection between the bucket and the frame, it has proved possible to establish both the similarity and the difference existing between various mechanisms of this type which have lately appeared in the market, as well as to map out the principal stages of their future evolution. If we examine only chains of three links (frame, jib, handle) and two kinds of cinematic pairs (the rotating and the prismatic), we shall see that out of 11 theoretically possible designs for the above mechanisms, modern excavator-builders have availed themselves only of four, viz, there exist at present designs only for excavators of the power shovel, ditcher, skimmer, and, quite lately, of the telescopic handle shovel types. Analysis shows that the other 7 possible designs either possess serious drawbacks when in operation, or else are practically unfit. Thus, we may conclude that modern American excavator-builders have exhausted all possibilities as concerns the designing of working mechanisms for one-bucket excavators with main rigid connection. A further evolution may, however, be expected for one-bucket excavators with main flexible connection (of the drag-line type), or else this evolution may consist in introducing other cinematic pairs, apart from the prismatic and the rotating.