

Вестник Евразийской науки / The Eurasian Scientific Journal <https://esj.today>

2020, №1, Том 12 / 2020, No 1, Vol 12 <https://esj.today/issue-1-2020.html>

URL статьи: <https://esj.today/PDF/22SAVN120.pdf>

**Ссылка для цитирования этой статьи:**

Кочетков А.В., Кульгильдинов М.С., Кадыров Ж.Н., Каукаров А.К., Оралбеков Р.О., Камзанов Н.С. Силовой анализ взаимодействия захватного устройства землеройной машины и каменных объектов // Вестник Евразийской науки, 2020 №1, <https://esj.today/PDF/22SAVN120.pdf> (доступ свободный). Загл. с экрана. Яз. рус., англ.

**For citation:**

Kochetkov A.V., Kulgildinov M.S., Kadyrov Zh.N., Kaukarov A.K., Oralbekov R.O., Kamsanov N.S. (2020). Force analysis of the interaction of the earthmoving machine gripper and stone objects. *The Eurasian Scientific Journal*, [online] 1(12). Available at: <https://esj.today/PDF/22SAVN120.pdf> (in Russian)

**УДК 531.53**

**Кочетков Андрей Викторович**

ФГБОУ ВО «Пермский национальный исследовательский политехнический университет», Пермь, Россия  
Профессор  
Доктор технических наук, профессор  
E-mail: soni.81@mail.ru

**Кульгильдинов Мурат Сапарбекович**

АО «Казахская академия транспорта и коммуникаций имени М. Тынышпаева», Алма-Ата, Республика Казахстан  
Заведующий кафедрой  
Доктор технических наук, профессор  
E-mail: mursap@mail.ru

**Кадыров Жаннат Нургалиевич**

ТОО «Контора патентного поверенного «Кадыров и партнеры», Алма-Ата, Республика Казахстан  
Директор  
Доктор технических наук, профессор  
E-mail: kadyrov.1954@mail.ru

**Каукаров Алтынбек Кубашевич**

АО «Казахская академия транспорта и коммуникаций имени М. Тынышпаева», Алма-Ата, Республика Казахстан  
Докторант  
E-mail: altynbek-79@mail.ru

**Оралбеков Рахат Оралбекович**

РГП на ПВХ «Восточно-Казахстанский государственный технический университет имени Д. Серикбаева»  
Министерства образования и науки Республики Казахстан, Усть-Каменогорск, Республика Казахстан  
Докторант  
E-mail: roralbekov@mail.ru

**Камзанов Нурбол Садыканович**

АО «Казахская академия транспорта и коммуникаций имени М. Тынышпаева», Алма-Ата, Республика Казахстан  
Докторант  
E-mail: mursap@mail.ru

**Силовой анализ взаимодействия захватного  
устройства землеройной машины и каменных объектов**

**Аннотация.** Тема статьи относится к рабочим органам экскаваторов, драглайнов и другой спецтехники для разработки содержащих крупные валуны грунтовых селевых выносов

(селевых масс) или различных объектов регулярной воспроизводимой формы, в том числе с прямолинейными элементами.

Проведен силовой анализ взаимодействия захватного устройства землеройной машины и каменных объектов, используемой при работах на объектах транспорта, автомобильных и лесовозных дорогах. Во всех случаях должны учитываться сила тяжести объекта, сила инерции при его переносе и реакции рабочих элементов в точках их контакта с поверхностью объекта.

Сформулированы приоритетные задачи геометрии захватывания рабочим органом землеройной машины крупных каменных объектов при работах на объектах транспорта, автомобильных и лесовозных дорогах.

Для многих задач геометрии захватывания необходимо рассматривать совокупность различных угловых ориентаций объекта, для чего следует использовать известные условия преобразования координат при вращении. Такое сложное движение описывается уравнениями преобразования параллельного переноса и поворота.

Показано, что для постановки, формализации и решения указанных задач необходимо унифицированное общее представление о поверхностях полости захватного устройства и захватываемого объекта. В процессе захватывания, при сжатии челюстей объект может перемещаться и поворачиваться.

**Ключевые слова:** схват; экскаватор; рабочий орган; землеройная машина; геометрия; каменные объекты; точки контакта; перемещение; перенос

## Введение

Перечислим этапы технологического процесса взаимодействия захватного устройства землеройной машины и каменных объектов при работах на объектах транспорта, автомобильных и лесовозных дорогах: подведение захватного устройства землеройной машины к объекту – захватывание – перенесение – установка на заданную позицию – отпускание.

Информационный обзор позволил выявить наиболее близкие технические аналоги [1–11].

Применительно ко всем задачам определения подлежат в первую очередь условия осуществления, а затем описание самих процессов (учитывается произвольность начального положения, наличие и отсутствие препятствий к осуществлению) [1–4].

Тема статьи относится к рабочим органам экскаваторов, драглайнов и другой спецтехники для разработки содержащих крупные валуны грунтовых селевых выносов (селевых масс) или различных объектов регулярной воспроизводимой формы, в том числе с прямолинейными элементами.

Отметим, что при переходах между различными этапами перемещения объектов манипулирования возможны нарушения, которые приводят к срыву объекта из захватного устройства, а в некоторых случаях повреждению захватного устройства.

## Постановка задачи

Цель работы – обеспечение эффективности захвата захватного устройства землеройной машины при работах на объектах транспорта, автомобильных и лесовозных дорогах.

Приложенные силы – это силы тяжести (всегда) и силы инерции (при переносе), а кроме того, реакции рабочих элементов захватного устройства землеройной машины. В каждой точке контакта рабочих элементов захватного устройства с объектом возникает реакция связи, имеющая нормальную и касательную к обоим поверхностям в точке контакта составляющие.

Имеется в виду, что после окончания процесса захватывания сжатием рабочих элементов схвата достигается состояние равновесия. Далее предполагается, что реализуется силовое захватывание, объект оказывается зажатым рабочими элементами; с позиций теоретической механики это означает, что к числу заданных сил относится сила сжатия рабочих элементов, кратко именуемая в дальнейшем силой (или усилием) захватывания.

В каждой  $i$ -ой точке контакта обязательно возникает нормальная составляющая  $N$  (при гладкости по крайней мере одного контактирующих контуров в условиях плоской задачи и одной поверхности в условиях трехмерной задачи), а касательная составляющая  $Q$  представляет силу трения (обычно используется модель сухого трения, когда она неопределенна, но ограничена предельными значениями).

Силовой анализ и определение условий равновесия связаны с выявлением условий статической определенности или неопределенности. При этом важнейшим является выбор альтернативы: учитывать или не учитывать силы трения.

В большинстве рассматриваемых задач получается, что без учета сил трения равновесие и (при действии только нормальных составляющих сил в точках контакта равновесие) не обеспечивается, а при учете сил трения задача становится статически неопределенной (число неизвестных превышает число уравнений статики).

Рассмотрим типовые варианты контакта для плоской задачи [5–8]. Контакт «зуба» с гладкой поверхностью, что встречается на практике может представляться специфическим; при относительно мягком материале зуб внедряется в поверхностный слой и представление об обычной силе трения оказывается заведомо слишком упрощенным. Однако при отказе от модели сухого трения целесообразно сохранить разложение усилия в точке контакта на нормальную и касательную составляющую.

В обычных расчетах более или менее известны предельные значения сил трения, которые при захватывании камней на открытых площадках могут изменяться в очень широких пределах.

Поэтому надежные результаты по условиям захватывания и удерживания нужно провести разделение захватных устройств, предназначенных для захватывания валунов и крупных камней, по следующим признакам:

- ковш, объект после захватывания лежит на горизонтальной плоскости или слабо изогнутой поверхности рабочего элемента;
- имеющие сближающиеся подвижные звенья, удерживающие захватываемый объект сжатием между гладкими поверхностями (в частности плоскостями) своих челюстей (могут иметь или не иметь собственные приводы); при этом точки контакта могут занимать различное положение в зависимости от исходного положения захватываемого объекта;
- имеющих острые зубья или кромки.

В обоих случаях контакт с твердыми захватываемыми объектами осуществляется в дискретных точках, положение которых на поверхностях объекта и рабочих элементов считается заданным.

В этих случаях определенной точке контакта возможны два варианта:

- когда в зоне контакта обе поверхности гладкие, в каждой точке с общей нормалью к обеим поверхностям;
- у объекта или рабочего элемента точечный контакт имеет место с острием, при этом точки контакта могут занимать различное положение.

Во всех случаях направление нормальных составляющих реакций в точках контакта однозначно определено (по общей нормали контактирующих поверхностей в точке контакта); но в отношении сил трения необходимы уточнения постановок задач. Все реакции во всех точках должны быть положительными, поскольку налагаемые связи в точках контакта являются неустойчивыми.

Применительно к приложению дополнительных сил при переносе задача усложняется. При этом могут быть поставлены следующие вопросы, ответы на которые различны:

Необходимые условия обеспечения и сохранения точечного контакта поверхностей рабочих элементов с захватываемым объектом, чтобы при фиксированном положении этих элементов в принципе было возможно существование и сохранение положения равновесия по крайней мере при малых действующих силовых факторах (силах и моментах сил веса и инерции при переносе). По методологии исследования эта задача является геометрически-кинематической.

Определение предельно допустимых значений возмущающих воздействий, при которых сохраняется положение равновесия объекта в захватном устройстве. По методологии эта задача является кинематически-силовой.

Получение представлений о процессах перемещения объекта в захватном устройстве в процессе схождения его рабочих элементов. По методологии эта задача может рассматриваться как силовая (при медленности процессов, представимых как последовательности состояний равновесия) или динамическая.

Во всех случаях должны учитываться сила тяжести объекта, сила инерции при его переносе и реакции рабочих элементов в точках их контакта с поверхностью объекта.

При этом необходимо обращать внимание на то, является ли соответствующая задача в общем виде статически определимой, или для получения однозначного решения нужно использовать дополнительные условия, или требуется использование более сложных математических моделей.

Рассмотрим на нескольких моделях первую задачу, используя различные общепринятые модели силового взаимодействия в дискретных точках объекта с рабочими элементами.

При этом будем различать необходимые, или необходимые и достаточные условия сохранения равновесия объекта в захватном устройстве.

В моделях контакта первого типа имеется в виду, что в каждой точке контакта исключается относительное перемещение объекта в широких диапазонах углов; это свойство имеет место, когда в точке контакта зуб рабочего элемента внедряется в тело объекта.

Тогда можно считать, что опора в виде зуба сопротивляется приложенной силе как угодно направленной в полуплоскости (для плоской задачи) или полупространстве (для трехмерной задачи). При этом не имеет смысла вводить представление о классических силах кулонова (сухого) трения.

Исходными при получении условий равновесия объекта в захватном устройстве являются уравнения статики; их три для плоской задачи и шесть для трехмерной. Практически

все эти уравнения удобно записывать в виде уравнений моментов вокруг определенных осей с тем, чтобы решения находились возможно проще.

В моделях контакта второго типа обе соприкасающиеся поверхности (объекта и рабочего элемента) считаются гладкими.

Тогда производится разделение силы взаимодействия на нормальную (по общей нормали) и касательную составляющие в плоской задаче линия действия однозначно определена.

При предварительном рассмотрении задачи представляется, что минимально необходимым условием для обеспечения и сохранения положения равновесия твердого тела с плоской нижней опорной поверхностью при одной действующей силе (например, силе тяжести) является опора на три точки, т. е. наличие трех точек контакта с рабочими элементами.

При этом несущественно, происходит ли контакт только с единственным рабочим элементом (например, в виде ковша), либо с двумя или тремя рабочими элементами, относительное положение которых фиксировано.

Часто точки опоры объекта без всяких оговорок представляются в виде неподвижно закрепленных шарниров, в которых невозможны никакие перемещения; как отмечалось выше это можно принять, если зубья челюстей внедряются в объект.

Однако и в этих случаях специфика задачи захватывания заключается в том, что налагаемые на объект связи при этом являются неустойчивыми, поэтому для сохранения равновесия необходимо, чтобы вектор равнодействующей приложенных сил (только силы тяжести или суммарный, с учетом силы инерции при переносе) был в пределах трехгранного угла между направлениями от центра масс к точечным опорам (рисунок 1).

Тогда в предположении, что реакции в шарнирах могут иметь любое направления (априори не наложены никакие ограничения), статическое равновесие обеспечивалось бы при любом расположении шарниров, причем система была бы статически трижды неопределима (девять неизвестных при шести уравнениях равновесия).

В то же время очевидно, что только двух (вместо трех) точек опоры недостаточно (не будет выполняться равновесие по моментам вокруг оси, соединяющей эти точки).

Более реалистичным по отношению к задачам захватывания объектов захватными устройствами с гладкими рабочими элементами представляется рисунок 1, на котором контакт осуществляется на гладких поверхностях.

Но в случаях, когда опоры принадлежат двум или трем рабочим элементам захватного устройства, должны быть дополнительно удовлетворены условия его нераскрытия под действием контактных сил; в дальнейшем эти дополнительные требования не учитываются.

Плоские фрагменты поверхностей рабочих элементов захватного устройства изображены в виде малых прямоугольников, отмечены точки контактов.

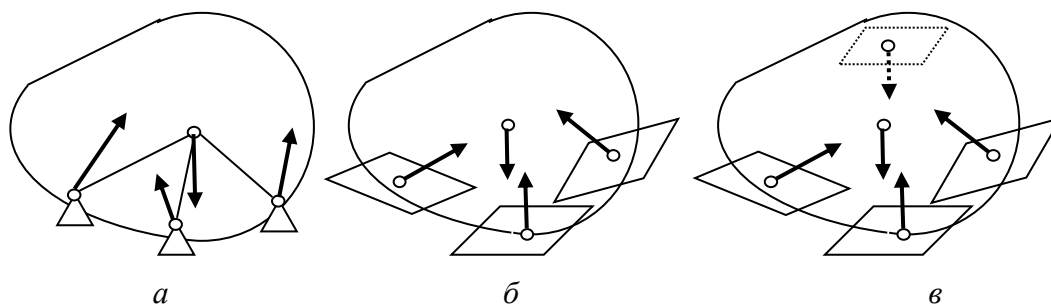


Рисунок 1. Варианты опоры захватываемого объекта на три точки (рисунок авторов)



При этом также сохраняется базирование на три точки. Реально три точки опоры могут быть получены при бесприводном захватном устройстве в виде трехгранного поддона или при имеющем двугранный поддон и приводной подвижный второй рабочий элемент.

Однако, когда для повышения производительности нужно обеспечивать режимы движения с большими ускорениями, необходимо принудительное прижатие объекта силой, направленной сверху вниз, для чего необходима еще одна точка контакта, в которой дополнительный рабочий элемент прикладывает вертикальную силу (на рис. 1в дополнительные площадка контакта и сила показаны пунктиром).

Если в точках контакта помимо нормальных реакций (показанных стрелками) учитываются также силы трения в указанных плоскостях, то при трех точках контакта общее число неизвестных в уравнениях статики равно девяти, и, как и в предыдущем варианте, задача статики оказывается трижды неопределимой.

В аналитической форме указанное требование записывается в виде трех основных неравенств, в которые входят тригонометрические параметры касательных плоскостей.

В пренебрежении силами трения, ограничения на величины которых в условиях рассматриваемых задач являются очень неопределенными, посадка объекта на три точки не обеспечивает однозначность положения (в первую очередь угловой ориентации) захватываемого объекта в захватном устройстве.

В тех случаях, когда ориентацию объекта при переносе и последующей укладке необходимо сохранять, не надеясь на то, что силы трения будут достаточно большими, целесообразно поставить вопрос об обеспечении относительного положения объекта в захватном устройстве под действием только нормальных составляющих реакций в точках контакта в условиях, когда к нему могут быть приложены силы и моменты.

Из самых общих соображений вытекает следующее [1].

Поскольку в трехмерной задаче равновесия объекта независимых уравнений шесть, то должно быть шесть опорных точек, в седьмой должна быть приложена сила, обеспечивающая положительность реакций в указанных шести точках с заданными запасами. Подобная идеология использовалась и используется при построении определенного вида механизмов параллельной структуры, которые относят к типу платформ Стюарта.

К числу базовых для рассматриваемой тематики относятся две основные геометрические задачи, определяющие возможность захватывания объектов с заданными поверхностями:

- задача возможности размещения захватываемого объекта в целом или его определенной части в полости захватного устройства;
- возможность свободного вхождения (или силового введения) объекта в указанную полость.

### Обсуждение полученных результатов

Очевидно, что для постановки, формализации и решения указанных задач необходимо унифицированное общее представление о поверхностях полости захватного устройства и захватываемого объекта.

Специфика задания геометрии полости захватного устройства заключается в том, что, во-первых, она, как правило, является незамкнутой, а во-вторых, она изменяется в процессе перемещения всех или некоторых рабочих элементов.

Самая простая двумерная схема выполняется с параллельными прямолинейными рабочими элементами. При сжатии рабочих элементов область сжимается. Для схемы клещевого захватного устройства области имеют вид трапеций.

Важной и самой простой геометрической характеристикой является размер «входного окна» захватного устройства.

В отличие от множества геометрических задач о размещении фигур, чтобы объект был захвачен нет необходимости, чтобы он полностью помещался в полость между рабочими элементами (требования конкретизируются на основе решения задач о возможностях удерживания объекта в захватном устройстве).

Однако существует приближенный подход, при котором для осуществления захватывания требуется, чтобы наибольший из размеров объекта не превышал размеров входного окна.

Может быть так, что объект может занять положение в полости захватного устройства в любой угловой ориентации, задаваемой тремя углами Эйлера или Крылова, или же реализуемы варианты угловой ориентации только при определенных ограничениях, налагаемых на углы.

Если на угловую ориентацию объекта наложены такие ограничения по угловой ориентации, то в случаях, когда положение объекта определяется посторонними, неуправляемыми или трудно предсказуемыми факторами, то ориентацию захватного устройства перед захватыванием нужно задавать определенным образом [9–11].

### **Выводы**

Проведен силовой анализ взаимодействия захватного устройства землеройной машины и каменных объектов, используемой при работах на объектах транспорта, автомобильных и лесовозных дорогах. Во всех случаях должны учитываться сила тяжести объекта, сила инерции при его переносе и реакции рабочих элементов в точках их контакта с поверхностью объекта.

Сформулированы приоритетные задачи геометрии захватывания рабочим органом землеройной машины крупных каменных объектов при работах на объектах транспорта, автомобильных и лесовозных дорогах.

Для многих задач геометрии захватывания необходимо рассматривать совокупность различных угловых ориентаций объекта, для чего следует использовать известные условия преобразования координат при вращении. Такое сложное движение описывается уравнениями преобразования параллельного переноса и поворота.

Показано, что для постановки, формализации и решения указанных задач необходимо унифицированное общее представление о поверхностях полости захватного устройства и захватываемого объекта. В процессе захватывания, при сжатии челюстей объект может перемещаться и поворачиваться.

Направлением будущих исследований является взаимодействие рабочего органа землеройной машины и крупного каменного объекта в статике и в движении с учетом локального и глобального представления поверхностей объекта.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Челпанов И.Б., Колпашников С.Н. Схваты промышленных роботов. – Л.: Машиностроение. Ленингр. отд-ние, 1989. – 287 с: ил.
2. Баловнев В.И. Моделирование процессов взаимодействия со средой рабочих органов дорожно-строительных машин. – М.: Машиностроение, 1994. – 452 с.
3. Ананин В.Г. Теория и расчет параметров рабочего оборудования одноковшовых экскаваторов с механическим приводом: дис. ... докт. техн. наук. – Томск, 2007. – 281 с.
4. Павлов В.П. Методология эффективного проектирования одноковшовых экскаваторов: автореф. ... докт. техн. наук. – М., 2008. – 43 с.
5. Altynbek Kaukarov, Natalia Kokodeeva, Andrey Kochetkov, Leonid Yankovsky and Igor Chelpanov. Capture of Large Objects by the Earthmoving Machine's Implement During Operation on Motor and Toting Roads Advances in Intelligent Systems and Computing, VIII International Scientific Siberian Transport Forum Trans Siberia 2019, Volume 2 Volume 1116 (2020) DOI: 10.1007/978-3-030-37919-3 <https://www.springer.com/us/book/9783030379186>.
6. Integrity assessment and determination of residual fatigue life of vital parts of bucket-wheel excavator operating under dynamic loads Engineering Failure Analysis, Dušan Arsić, Nebojša Gnjatović, Simon Sedmak, Aleksandra Arsić, Milan Uhričik, Volume 105, November 2019, Pages 182–195.
7. Evaluation of Single-bucket Excavators Energy Consumption. Procedia Engineering, A.P. Komissarov, Y.A. Lagunova, O.A. Lukashuk Volume 150, 2016, Pages 1221–1226.
8. Bucket Wheel Excavator Damage by Fatigue Fracture – Case Study Procedia Materials Science, Darko Danicic, Stojan Sedmak, Dragan Ignjatovic, Slobodan Mitrovic. Volume 3, 2014, Pages 1723–1728.
9. Determination of Residual Fatigue Life of Welded Structures at Bucket-Wheel Excavators through the Use of Fracture M. Arsić, S. Bošnjak, N. Gnjatović, S.A. Sedmak, Z. Savić. Mechanics Procedia Structural Integrity, Volume 13, 2018, Pages 79–84.
10. Bucket trajectory classification of mining excavators Automation in Construction, Rashi Tiwari, Jeremy Knowles, George Danko, Volume 31, May 2013, Pages 128–139.
11. Flexible virtual fixtures for human-excavator cooperative system. Hao Feng, Chenbo Yin, Rong Li, Wei Ma, Junjing Zhou. Automation in Construction, Volume 106, October 2019, Article 102897.



**Kochetkov Andrey Viktorovich**

Perm national research polytechnical university, Perm, Russia  
E-mail: soni.81@mail.ru

**Kulgildinov Murat Saparbekovich**

Kazakh academy of transport and communications named after M. Tynyshpaev, Alma-Ata, Republic of Kazakhstan  
E-mail: mursap@mail.ru

**Kadyrov Zhannat Nurgalievich**

Office of the patent attorney «Kadyrov and partners», Alma-Ata, Republic of Kazakhstan  
E-mail: kadyrov.1954@mail.ru

**Kaukarov Altunbek Kubachevich**

Kazakh academy of transport and communications named after M. Tynyshpaev, Alma-Ata, Republic of Kazakhstan  
E-mail: altynbek-79@mail.ru

**Oralbekov Rakhat Oralbekovich**

D. Serikbayev east Kazakhstan state technical university, Ust-Kamenogorsk, Republic of Kazakhstan  
E-mail: roralbekov@mail.ru

**Kamsanov Nurbol Sadykanovich**

Kazakh academy of transport and communications named after M. Tynyshpaev, Alma-Ata, Republic of Kazakhstan  
E-mail: mursap@mail.ru

## **Force analysis of the interaction of the earthmoving machine gripper and stone objects**

**Abstract.** The topic of the article refers to the working bodies of excavators, draglines and other special equipment for the development of large boulders containing ground mudflows (mud masses) or various objects of regular reproducible form, including straight elements.

A power analysis of the interaction of the earthmoving machine gripper and stone objects used for work on transport objects, roads and logging roads was carried out. In all cases, the gravity of the object, the force of inertia during its transfer, and the reaction of the working elements at the points of contact with the surface of the object must be taken into account.

The priority tasks of the geometry of capturing large stone objects by the working body of the earthmoving machine when working on transport objects, automobile and logging roads are formulated.

For many capture geometry problems, it is necessary to consider a set of different angular orientations of the object, for which you should use the known conditions for converting coordinates during rotation. This complex movement is described by the parallel transfer and rotation transformation equations.

It is shown that for the formulation, formalization and solution of these problems, a unified General idea of the surfaces of the cavity of the gripper device and the object being captured is necessary. During the gripping process, when the jaws are compressed, the object can move and rotate.

**Keywords:** tong; excavator; working body; earthmoving machine; geometry; stone objects; contact points; moving; transfer