



Научная статья

УДК 621.926

<https://doi.org/10.21285/1814-3520-2023-1-48-60>

Исследование напряжений и деформаций зубьев ковшей землеройных машин

А.Г. Осипов^{1✉}, У.А. Васечкин²^{1,2}Иркутский национальный исследовательский технический университет, г. Иркутск, Россия

Резюме. Целью представленной работы является анализ существующих конструкций зубьев ковшей землеройных машин и научно обоснованный выбор оптимальной конструкции. Объектом исследований явились 6 моделей конструкций зубьев землеройных машин, выполненных из легированной марганцевой стали марки 110Г13Л. Построение моделей зубьев осуществлялось с помощью компьютерной программы КОМПАС-3D. Расчет продольных упругих внутренних напряжений и определение упругих деформаций в моделях зубьев проводился с использованием программного продукта COMSOL Multiphysics. Рассчитаны продольные упругие внутренние напряжения и определены упругие деформации моделей зубьев при приложенной к ним нагрузке на мягких грунтах 9 кН, а на скальных – 90 кН. Установлены оптимальные конструкции зубьев для грунтов различной категории твердости. На основании полученных результатов исследований выявлено, что на мягких грунтах оптимальным сочетанием эффективности и прочности обладает зуб-рыхлитель, а также комбинированный криволинейный зуб с дополнительным зубом-рыхлителем. Показано, что если принять упругую деформацию стандартного зуба на мягких породах за 100%, то деформация зуба-рыхлителя, в зависимости от исходного состояния, составляет 30–35%, а комбинированного криволинейного зуба с дополнительным зубом-рыхлителем – 32–35%. Установлено, что на твердых грунтах наилучшим сочетанием эффективности и прочности обладает комбинированный криволинейный зуб с дополнительным зубом-рыхлителем, а также обычный криволинейный зуб. Так, если принять упругую деформацию стандартного зуба на твердых породах за 100%, то деформация комбинированного криволинейного зуба с дополнительным зубом-рыхлителем в зависимости от исходного состояния составляет 18–20%, а криволинейного зуба – 42–45%. Научно обоснована целесообразность применения на землеройных машинах ковшей с комбинированными зубьями оптимальной конструкции. В дальнейшем планируется исследовать различные конструкции ковшей землеройных машин и определить оптимальную, позволяющую целесообразно применять ее на грунтах разной категории твердости.

Ключевые слова: землеройные машины, рабочие органы с ковшами, зубья ковшей, зуб оптимальной конструкции, напряжения и деформации

Для цитирования: Осипов А.Г., Васечкин У.А. Исследование напряжений и деформаций зубьев ковшей землеройных машин // iPolytech Journal. 2023. Т. 27. № 1. С. 48–60. <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2023-1-48-60>.

MECHANICAL ENGINEERING AND MACHINE SCIENCE

Original article

Studies of stress and strain in bucket teeth of earth-moving machines

Artur G. Osipov^{1✉}, Ulyan A. Vasechkin²^{1,2}Irkutsk National Research Technical University, Irkutsk, Russia

Abstract. This paper aims to analyze the existing designs of bucket teeth in earth-moving machines with the purpose of selecting an optimal design in a scientifically grounded manner. The research objects included six design models of teeth of earth-moving machines made of alloyed manganese steel 110G13L. Teeth models were built using the KOMPAS-3D software. Lateral elastic internal stresses and elastic strains in the teeth models were determined using the COMSOL Multiphysics software. Lateral elastic internal stresses and elastic strains were calculated for the applied load of 9 kN in soft soil and 90 kN in rocky soil. Optimal teeth designs were determined for soils of various hardness. In soft soils, a ripper

tooth and a combined curved tooth with an extra ripper tooth showed the optimum combination of efficiency and strength. Thus, provided that the elastic strain of a standard tooth in soft soils equals 100% and depending on the initial state, a ripper tooth and a combined curved tooth with an extra ripper tooth showed the strain values of 30–50% and 32–35%, respectively. In hard soils, a combined curved tooth with an extra ripper tooth and a regular curved tooth showed the optimum combination of efficiency and strength. Thus, provided that the elastic strain of a standard tooth in hard soil equals 100% and depending on the initial state, a combined curved tooth with an extra ripper tooth and a curved tooth showed the strain values of 18–20% and 42–45%, respectively. The feasibility of using buckets with combined teeth of optimal design in earth-moving machines was scientifically substantiated. Future research will investigate various bucket designs of earth-moving machines to find their optimal modifications for soils of various hardness.

Keywords: earth-moving machines, working bodies with buckets, bucket teeth; optimal design tooth; stresses and deformations

For citation: Osipov A.G., Vasechkin U.A. Studies of stress and strain in bucket teeth of earth-moving machines. *iPolytech Journal*. 2023;27(1):48-60. (In Russ.). <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2023-1-48-60>.

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время для разработки грунтов различной категории твердости, добычи полезных ископаемых, прокладывания в них тоннелей и траншей, а так же выполнения работ по рыхлению, выемке, погрузке, распределению, транспортировке различных материалов существует большой типоразмерный ряд землеройных машин, базирующихся на самоходных колесных, гусеничных, шагающих и прицепных шасси [1].

В зависимости от назначения конструкции землеройные машины значительно отличаются друг от друга и в первом приближении могут классифицироваться на погрузчики, одноковшовые экскаваторы, скреперы, драглайны, грузоподъемные краны с грейферами и другие машины [2].

Все вышеперечисленные машины объединяет один общий конструктивный компонент – рабочий орган с ковшом, оборудованным зубьями, предназначенными для разрушения и рыхления грунта или породы. Несмотря на сопоставимость конструкции, ковши имеют

значительные различия в исполнении (рис. 1) [3–6].

Практика показывает, что наиболее распространенной и универсальной землеройной машиной в настоящее время является одноковшовый экскаватор, так как с его помощью выполняется до 40...45% всех земляных работ [7–9].

Для обеспечения наибольшей производительности и увеличения ресурса землеройных машин необходимо правильно подбирать ковши не только в соответствии с видом предполагаемых работ (защитка, погрузка, рыхление, планировка, выемка траншей, скалывание, профилирование), но и с учетом категории твердости разрабатываемого грунта или породы.

Как уже отмечалось, правильный выбор ковша должен осуществляться с учетом категории твердости разрабатываемых грунтов, которые в первом приближении по абразивности и плотности классифицируются на низкие, средние и высокие.

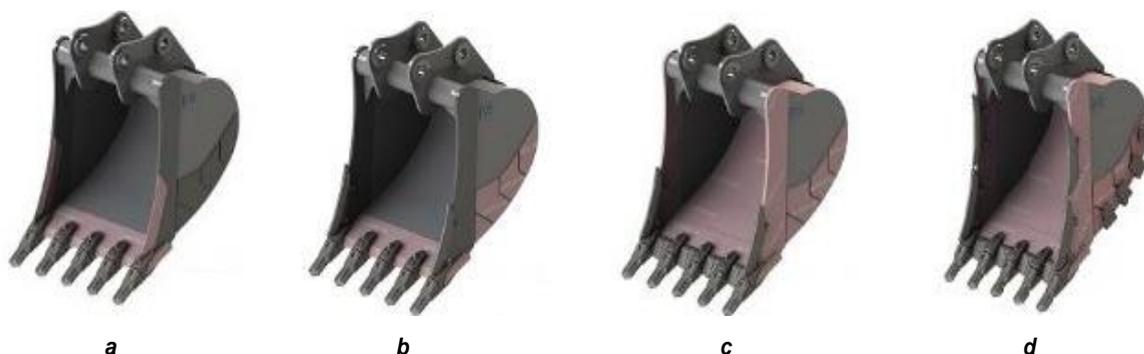


Рис. 1. Конструктивное исполнение ковшей: а – ковши общего назначения; б – усиленные ковши; с – скальные ковши; d – скальные сверхусиленные ковши

Fig. 1. Design of buckets: a – general purpose buckets; b – reinforced buckets; c – rock buckets; d – super duty rock buckets

Наиболее важными компонентами ковша, имеющего в основном сварно-литую конструкцию, являются зубья, закрепляемые на его кромке клиновым способом. Для изготовления зубьев широко используют легированную сталь марки 110Г13Л, отличающуюся высокой прочностью и устойчивостью к абразивному истиранию [10].

Зубья предназначены для разрушения и рыхления грунта или горной породы. Они первыми вступают во взаимодействие с разрабатываемым грунтом или горной породой, приводя их к разрушению [11]. При этом зубья подвергаются ударным и разрушительным нагрузкам, приводящим к изменению первоначальной конфигурации зуба [12]. При этом максимальное воздействие приходится на грани зуба, что приводит к его износу, уменьшению длины и снижению его технических характеристик.

В свою очередь, износ зубьев снижает производительность землеройной машины и влечет за собой экономические потери, связанные с сокращением ресурса машины. Поэтому основной целью представленной работы является научно обоснованный выбор конструкции

зубьев ковша землеройных машин.

Конструктивное исполнение зубьев.

Геометрия зуба и его технические характеристики оговариваются в конструкторской документации землеройной машины и зависят от категории твердости разрабатываемых грунтов и горных пород.

Следует отметить, что конструкция зубьев ковша (рис. 2) прежде всего определяется видом производимых работ.

В первом приближении зуб состоит из режущей части и хвостовика с пазами, предназначенными для его крепления на кромке ковша. К техническим характеристикам зубьев ковша землеройных машин предъявляются особые требования, чем они выше, тем больше производительность машины и дольше ее ресурс.

Совершенствованию зубьев ковшей землеройных машин уделяется большое внимание. В этом направлении работают как ученые, так и практики. Полученные ими результаты показывают, что в процессе работы зубья подвергаются значительному износу, при этом их технические характеристики снижаются до недопустимых пределов.

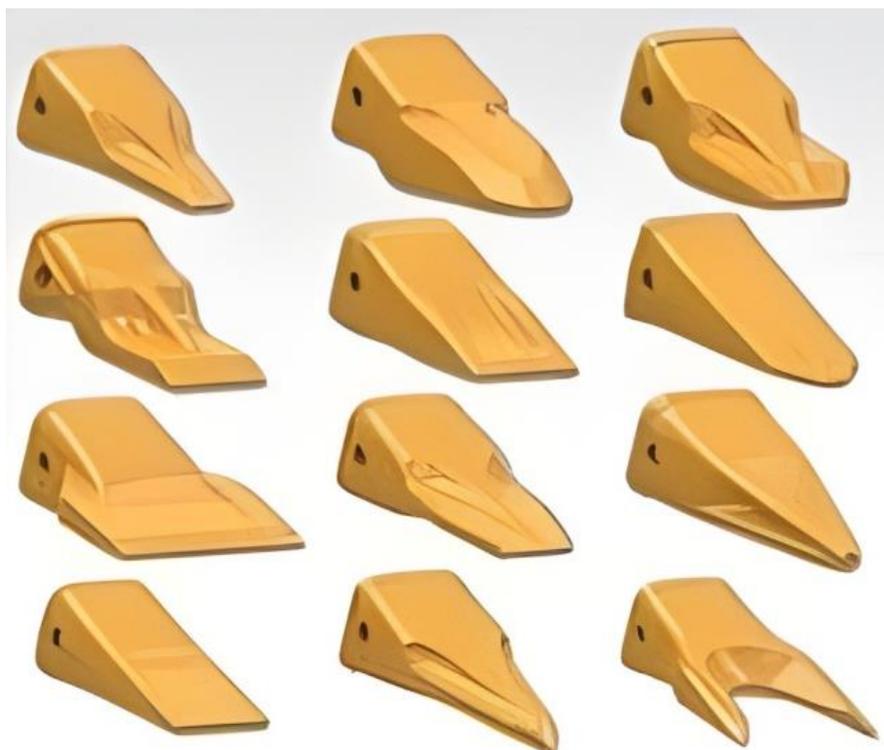


Рис. 2. Конструкция зубьев ковша землеройной машины
Fig. 2. Designs of earth-moving machine bucket teeth

По данным Ю.А. Ветрова, при полном износе зуба угол его режущей части увеличивается в 2–2,5 раза, достигая 65–70° вместо 26°, как у нового зуба, при этом его рабочая длина уменьшается в 3–4 раза [13].

Работа при изношенных зубьях снижает производительность землеройной машины и сокращает ее ресурс.

В результате проводимых в последнее время научно-исследовательских и конструкторских работ удалось снизить энергоемкость рабочих процессов на 20–50%, повысить производительность землеройных машин на 15–40% и увеличить их ресурс за счет усовершенствования режущих частей зубьев ковша [14].

Экспериментальным путем А.С. Ребровым установлена оптимальная геометрия режущей части зуба и предложены расчетные формулы для определения ширины рабочей части зуба, длины этой части, а также угла заострения зуба, принятого для новых зубьев равным 26° [13]. Предложенные зависимости широко применяются для определения геометрии режущей части зубьев при проектировании отечественных землеройных машин.

Продолжаются работы в направлении повышения износостойкости зубьев и подбора новых материалов для их изготовления и наплавки режущей части. При этом широко используется легированная марганцевая

сталь марки 110Г13Л (сталь Гатфильда). Она обладает следующими физико-механическими свойствами: высокой износостойкостью, способностью воспринимать большие динамические и статические нагрузки. Имеет предел прочности $\sigma_v = 800\text{--}900$ МПа, условный предел текучести $\sigma_{0,2} = 310\text{--}350$ МПа, модуль упругости $E = 200000$ МПа, модуль сдвига $G = 78000$ МПа.

В целях повышения эффективности работы режущих зубьев, за счет оптимизации их геометрии, в настоящее время используются различные численные методы расчета долговечности режущих зубьев [15] и специальные программы, в частности, программный продукт COMSOL Multiphysics.

Заслуживают внимания широкопроводимые в настоящее время исследования в направлении биомеханического моделирования режущих зубьев землеройных машин [16–18].

Отдельные работы, посвященные совершенствованию зубьев ковшей землеройных машин, характеризуются патентной чистотой и защищены патентами Российской Федерации и авторскими свидетельствами СССР^{3,4}. Представляют теоретический и практический интерес разработки ковшей с адаптирующимися зубьями, описанными в трудах [19, 20].

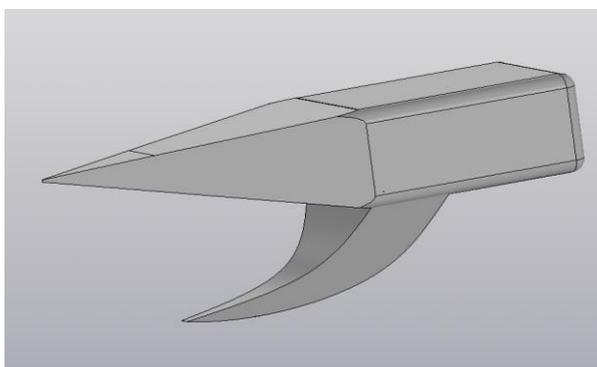


Рис. 3. Конструкция комбинированного зуба с дополнительным зубом-рыхлителем
Fig. 3. Design of a combined tooth with an additional ripper tooth

³А. с. № 1134681, СССР, Е 02 F 9/28. Зуб к ковшу землеройной машины / Р.У. Шукуров, М.А. Тылкин, Т.И. Аскарходжаев, Р.Х. Валеев, Ю.И. Густов; заявитель и патентообладатель Ташкентский автомобильно-дорожный институт. Заявл. 31.03.82; опубл. 15.01.85. Бюл. № 2.

⁴А. с. № 1198163, СССР, Е 02 F 3/40. Ковш экскаватора / Т.И. Аскарходжаев, А.А. Абдуразаков, Р.Х. Валеев, Р.У. Шукуров, В.П. Брыков; заявитель и патентообладатель Ташкентский автомобильно-дорожный институт. Заявл. 31.03.82; опубл. 15.12.85. Бюл. № 46.

Как уже отмечалось, практика показывает, что наиболее распространенной и универсальной землеройной машиной является в настоящее время одноковшовый экскаватор, так как с его помощью выполняется до 40...45% земляных работ [7–9].

Для дальнейшего повышения производительности землеройных машин и увеличения их ресурса в последнее время могут применяться комбинированные зубья, предназначенные как для разрушения, так и рыхления грунта. При этом основной зуб может с дополнительным зубом-рыхлителем, как показано на рис. 3. (моделирование конструкции зуба ковша проводилось с помощью компьютерной программы КОМПАС-3D, разработанной российской компанией «Аскон»). Показанная на рис. 3 конструкция комбинированного зуба теоретически может применяться как на обычных ковшах с расположением зубьев только на режущей кромке, так и на специализированных ковшах-рыхлителях с расположением зубьев по всему днищу ковша.

В первом случае рабочий орган экскаватора или другой землеройной машины работает следующим образом. Во время наполнения ковша основные зубья срезают и разрыхляют определенную часть грунта, при этом дополнительные зубья-рыхлители, расположенные ниже основных зубьев, дополнительно рыхлят разрабатываемый грунт, незатронутый основными зубьями. Таким образом, происходит подготовка грунта или породы к следующему рабочему циклу.

Рабочий орган экскаватора или другой землеройной машины во втором случае, когда комбинированные зубья применяются на ковшах-рыхлителях, работает следующим образом. Во время первого рабочего цикла происходит наполнение ковша грунтом или породой, при этом основные зубья срезают и разрыхляют определенную часть разрабатываемого грунта, одновременно и дополнительные зубья-рыхлители, расположенные ниже основных зубьев. Начинают разрабатывать грунт, который остался незатронутым предыдущими зубьями. В это же время во взаимодействии с грунтом или породой начинают вступать зубья, расположенные на

днище ковша, еще больше и глубже разрушая и разрыхляя разрабатываемый грунт.

Во время последующих рабочих циклов основные зубья, расположенные на режущей кромке ковша, и расположенные на днище ковша зубья выполняют те же функции, что и в первом цикле. Однако дополнительные зубья-рыхлители, находящиеся ниже основных зубьев, производят дополнительное рыхление грунта, разрушенного и разработанного в предыдущих рабочих циклах, таким образом разрыхляя грунт до более мелких фракций, что облегчает наполнение ковша грунтом и удешевляет дальнейшую переработку горной породы на обогатительных фабриках.

Дополнительные зубья-рыхлители могут выполняться практически на всех типах зубьев, располагаемых на режущей кромке ковша землеройной машины. Такая необходимость возникает при работе землеройной машины на мерзлом грунте, скальных породах, а так же при разработке тяжелых грунтов с многочисленными твердыми включениями.

Моделирование зубьев. Для научного обоснования оптимальной конструкции зуба ковша в данной работе построены расчетные модели основных типов зубьев, распространенных в настоящее время (рис. 4).

В частности, для проведения расчетов построены модели как традиционно существующих (рис. 4 *a–d*), так и новых комбинированных зубьев (рис. 4 *e, f*). При этом использовались наиболее распространенные типы зубьев ковша, в том числе стандартный зуб (рис. 4 *a*), скальный зуб (рис. 4 *b*), зуб-рыхлитель (рис. 4 *c*), предназначенный для рыхления непрочных пород, а так же криволинейный зуб (рис. 4 *d*), рекомендованный в работах Р.У. Шукурова (ТАДИ, г. Ташкент, Узбекистан) в связи с его высокими техническими показателями [16–18].

Наряду с моделями широкоизвестных зубьев были построены расчетные модели новых комбинированных криволинейных зубьев с дополнительными рыхлителями разных конфигураций, а именно – с обычным дополнительным рыхлителем (рис. 4 *e*) и усиленным дополнительным рыхлителем (рис. 4 *f*).

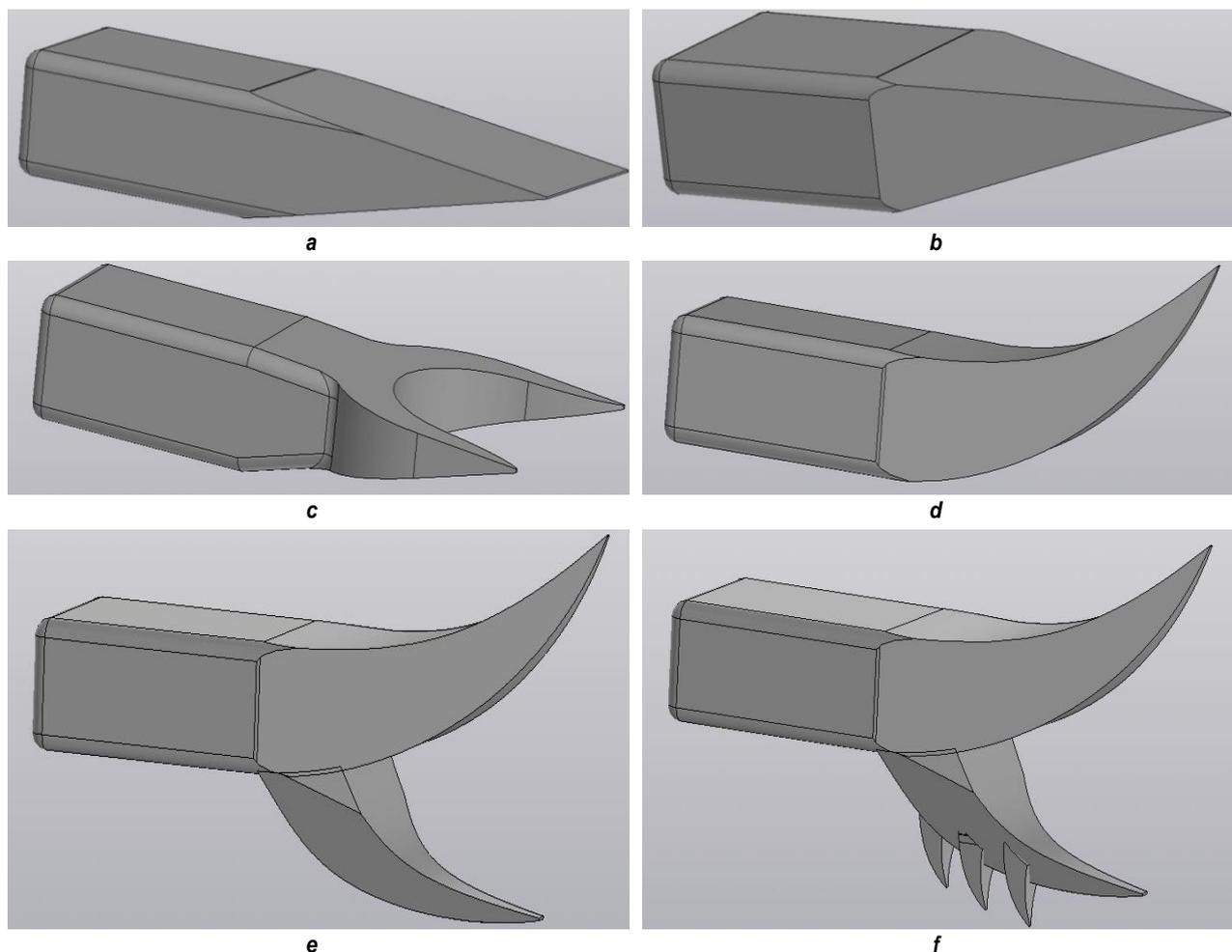


Рис. 4. Построенные расчетные модели зубьев: а – стандартный; б – скальный; с – рыхлитель; д – криволинейный; е – криволинейный с дополнительным рыхлителем; ф – криволинейный с усиленным дополнительным рыхлителем
Fig. 4. Constructed design models of bucket teeth: a – standard long; b – rock chisel; c – ripper (Twin Tiger); d – curved (penetration); e – curved with an additional ripper; f – curved with a reinforced additional ripper

Для исследования построенных моделей использована инженерная расчетная программа COMSOL Multiphysics (компания COMSOL Inc., Швеция). Эта программа позволила спрогнозировать распределение продольных упругих внутренних напряжений в зубе и получить его упругую деформацию при взаимодействии с различными по твердости категориями грунтов и пород.

Используя вышеуказанный программный продукт, исследуем построенные модели зубьев, предполагая, что они используются на мягких грунтах.

В программу вносим геометрическую расчетную модель, выбираем материал – легированную марганцевую сталь марки 110Г13Л, из которой она будет выполнена, принимаем

места жесткой заделки; задаем граничные условия и нагрузки по осям; строим конечно-элементную сетку; запускаем программу на счет и получаем графическое распределение продольных упругих внутренних напряжений и деформаций зуба на мягких грунтах (рис. 5 а–ф).

При разработке грунта или породы на зубья действует сила сопротивления копанью, а так как зуб входит в грунт под определенным углом, то дополнительно возникает изгибающий момент. Для упрощения расчета примем, что данные нагрузки воздействуют на зуб только в продольной плоскости, следовательно, возникают только продольные упругие внутренние напряжения и деформации. Деформации в разных зонах зуба разные: в

нижней части происходит растяжение волокон стали, а в верхней, наоборот, сжатие, но в дальнейшем деформацию будем рассматривать обобщенно, как перемещение зуба из исходного состояния в конечное.

Согласно работам Р.У. Шукурова, наиболее эффективным углом резания является угол 40° , при этом зубья должны выдерживать минимальную нагрузку не менее 60 кН и максимальную около 90 кН.

Согласно ГОСТ 12248-2020⁵, прочность мягких и скальных пород отличается между собой более чем в 10 раз. Таким образом, приближая наши исследования к реальным условиям работы, принимаем, что угол резания составляет 40° , а воспринимаемая зубом нагрузка на мягких грунтах – 9, а на скальных – 90 кН.

Данная работа направлена на установление оптимальной по эффективности и долговечности конструкции зуба. Поскольку при исследовании моделей зубьев использовалась только сталь одной марки, а модели зубьев имеют одинаковый размер, возникающие продольные упругие внутренние напряжения и деформации в исследуемых зубьях будем сравнивать с продольными упругими внутренними напряжениями и деформациями, возникающими в стандартном зубе, так как именно в нем наблюдаются самые большие изменения.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

По результатам исследований на рис. 5 и 6 можно наблюдать распределение продольных упругих внутренних напряжений, возникающих в моделях зубьев под действием силы сопротивления копания и изгибающего момента, а так же наблюдать упругую деформацию зубьев, которые прогибаются в противоположную сторону от действующей нагрузки.

Продольные упругие внутренние напряжения и деформации постепенно уменьшаются от места соприкосновения с грунтом до места фиксации зуба. Недеформированное состояние зубьев изображено сплошными черными линиями, которые образуют контур исходного

состояния зуба, а деформированное состояние показано сплошной фигурой, на которой разными цветами показаны продольные упругие внутренние напряжения, постепенно распределенные в зубе. На данных рисунках цифрами обозначены геометрические размеры зубьев. Для чистоты результатов исследований все модели зубьев выполнялись одного размера.

Оси координат обозначены в нижнем левом углу рисунков *a–f*, объединенных в общие рис. 5 и 6. Сами зубья по умолчанию в программе располагаются в координатной сетке, цифры на которой обозначают геометрические размеры зубьев в метрах. С правой стороны рисунков располагаются две шкалы, одна из которых обозначает зависимость цвета напряжений от их численных значений, обозначенных в МПа, а другая показывает деформацию зуба в процентах, при этом деформация стандартного зуба взята за 100%, а все остальные зубья сравниваются с ней.

Проведенные исследования при угле резания 40° и нагрузке 9 кН на мягких грунтах показали, что скальный и криволинейный зубья (рис. 5 *b, d*) обладают весьма маленькими продольными упругими внутренними деформациями и возникающими в них напряжениями из-за маленькой площади взаимодействия кромки зуба с грунтом, однако из-за этого они малоэффективны на мягких грунтах, так как недостаточно разрыхляют грунт. Они подобно ножу прорезают грунт, не обеспечивая достаточного рыхления.

Из полученных результатов также видно, что на мягких грунтах самые большие упругие напряжения и деформации возникают в стандартном зубе (рис. 5 *a*), что связано с большой площадью взаимодействия кромки зуба с грунтом. Несмотря на это, им обеспечивается достаточное рыхление.

Зуб-рыхлитель подвержен большим продольным упругим внутренним деформациям и возникающим напряжениям (рис. 5 *c*), однако благодаря двум заостренным наконечникам внедрение в грунт происходит более легко, чем у стандартного зуба, поэтому напряжения

⁵ГОСТ 12248-2020. Грунты. Определение характеристик деформируемости методом компрессионного сжатия. Введ. 01.06.2021.

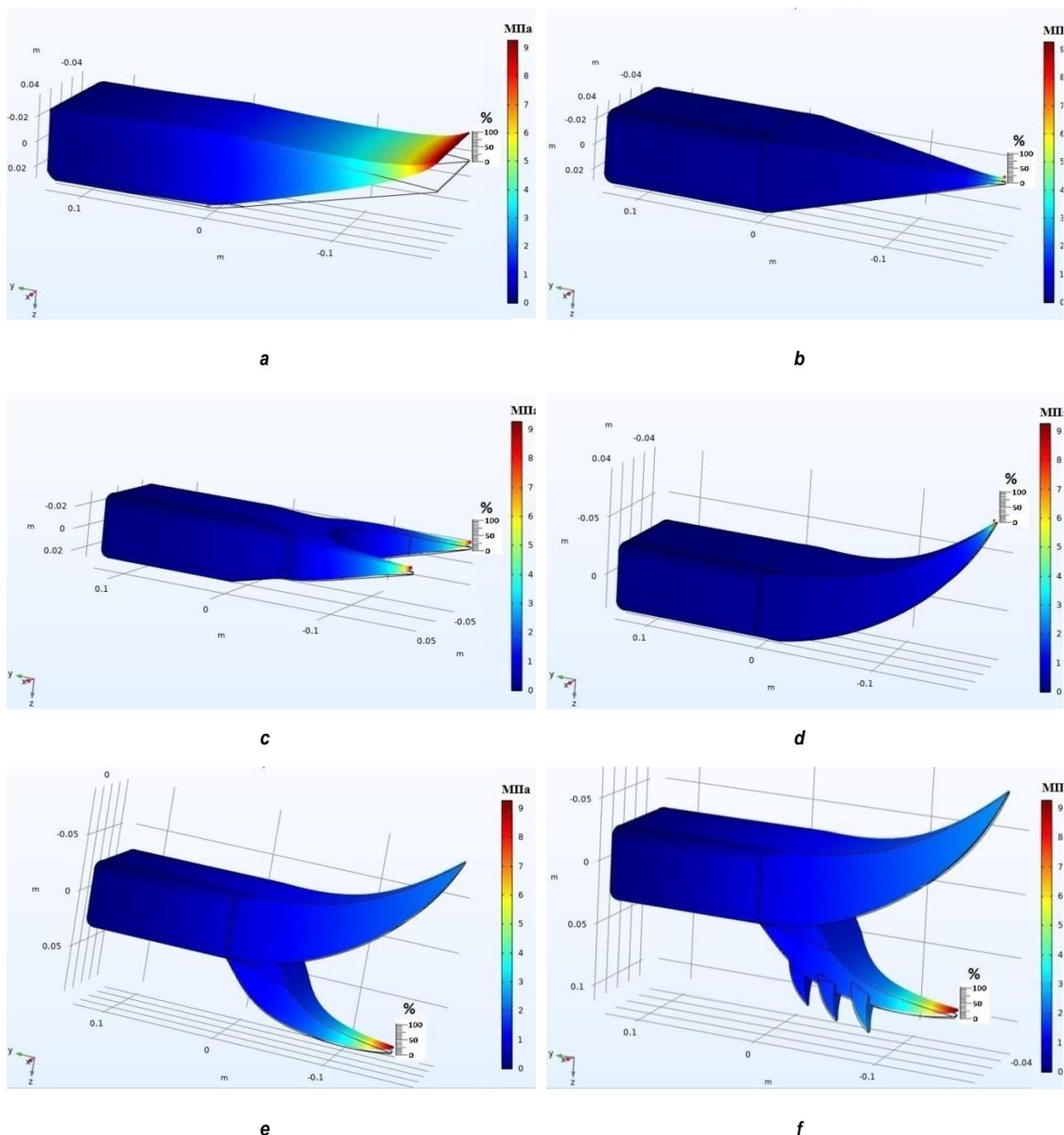


Рис. 5. Распределение продольных упругих внутренних напряжений и деформаций в зубьях моделей при работе на мягких грунтах: а – стандартный; б – скальный; с – рыхлитель; д – криволинейный; е – криволинейный с рыхлителем; ф – криволинейный с усиленным рыхлителем
Fig. 5. Distribution of longitudinal internal elastic stresses and deformations in the bucket teeth of models operating in soft soils: a – standard long tooth; b – rock chisel; c – ripper (Twin Tiger); d – curved (penetration); e – curved tooth with a ripper; f – curved tooth with a reinforced ripper

и деформации в зубе меньше. При этом захватываемая площадь грунта больше, чем у стандартного зуба, что обеспечивает лучшее разрушение и рыхление мягких грунтов.

Комбинированные криволинейные зубья с дополнительным зубом-рыхлителем и с

дополнительным усиленным зубом-рыхлителем также обеспечивают достаточное разрушение и рыхление мягких грунтов из-за большой площади взаимодействия поверхности зуба с грунтом. На рис. 5 е, ф видно, что в них действуют небольшие продольные упругие

внутренние напряжения и они подвержены наибольшим упругим деформациям, что обеспечивается благодаря заостренным наконечникам и изогнутой форме зубьев.

Существующая проблема скального и криволинейного зубьев, заключающаяся в недостаточном рыхлении грунта, в данном случае решается благодаря дополнительному зубу-рыхлителю.

Если принять упругую деформацию стандартного зуба на мягких породах за 100%, то деформация скального и криволинейного зубьев, в зависимости от исходного состояния, составляет 12–15%, зуба-рыхлителя – 30–35%, криволинейного зуба с дополнительным зубом-рыхлителем и криволинейного зуба с дополнительным усиленным зубом-рыхлителем – 32–35%.

Показания комбинированного криволинейного зуба с дополнительным зубом-рыхлителем и зуба с дополнительным усиленным зубом-рыхлителем практически идентичны. Из этого следует, что применять комбинированный зуб с дополнительным усиленным зубом-рыхлителем нецелесообразно. При этом деформация дополнительного зуба-рыхлителя в обеих моделях больше, чем деформация зуба-рыхлителя (см. рис. 5 с).

На основании полученных результатов исследований можно сделать вывод, что на мягких грунтах оптимальным сочетанием эффективности и прочности обладает зуб-рыхлитель (см. рис. 5 с), а после него стоит комбинированный криволинейный зуб с дополнительным зубом-рыхлителем (см. рис. 5 е).

На втором этапе исследований зубьев полагаем, что они работают на твердых грунтах с многочисленными каменистыми включениями, или на тяжелых грунтах в условиях вечной мерзлоты при угле резания 40° и нагрузке 90 кН.

По результатам исследований второго этапа (рис. 6 а–г) четко видно, что на скальных породах и тяжелых грунтах в зубьях возникают более значительные продольные упругие внутренние напряжения, следовательно, возникают более крупные упругие деформации по сравнению с деформациями зубьев на мягких грунтах.

В стандартном зубе и зубе-рыхлителе

возникают самые большие напряжения, таким образом, и наибольшие деформации (рис. 6 а, с). Поэтому они не предназначены для работы в данных условиях, а предназначены только для работы на мягких грунтах.

В скальном зубе также наблюдаются большие продольные упругие внутренние напряжения и деформации (рис. 6 б), но уже значительно меньшие, чем в предыдущих двух зубьях (рис. 6 а, с). Следовательно, этот зуб более приспособлен для данных условий.

В криволинейном зубе возникающие напряжения и деформации меньше чем в два раза (рис. 6 д) по сравнению со стандартным зубом и зубом-рыхлителем. Однако применение на его нижней поверхности дополнительного зуба-рыхлителя или дополнительного усиленного зуба-рыхлителя позволяет уменьшить напряжения и деформации в зубе еще в два раза (рис. 6 е, г) по сравнению с обычным криволинейным зубом.

Если принять упругую деформацию стандартного зуба на скальных породах за 100%, то деформация скального зуба в зависимости от исходного состояния составляет 52–55%, зуба-рыхлителя примерно – 105%, криволинейного зуба – 42–45%, комбинированного криволинейного зуба с дополнительным зубом-рыхлителем и комбинированного криволинейного зуба с дополнительным усиленным зубом-рыхлителем – 18–20%.

Как и в случае с мягкими грунтами, дополнительный усиленный зуб-рыхлитель не дает практически полезного эффекта, однако он незначительно уменьшает продольные упругие внутренние напряжения и деформации в зубе. Следует отметить, что изготовление данного зуба из-за сложности конструкции будет весьма проблематично и дорого. На основании вышеотмеченного можно заключить, что его применение на практике нецелесообразно.

По результатам исследований второго этапа можно сделать вывод, что на скальных породах и тяжелых мерзлых грунтах наилучшим сочетанием эффективности и прочности обладает комбинированный криволинейный зуб с дополнительным зубом-рыхлителем (см. рис. 3), а на втором месте – обычный криволинейный зуб.

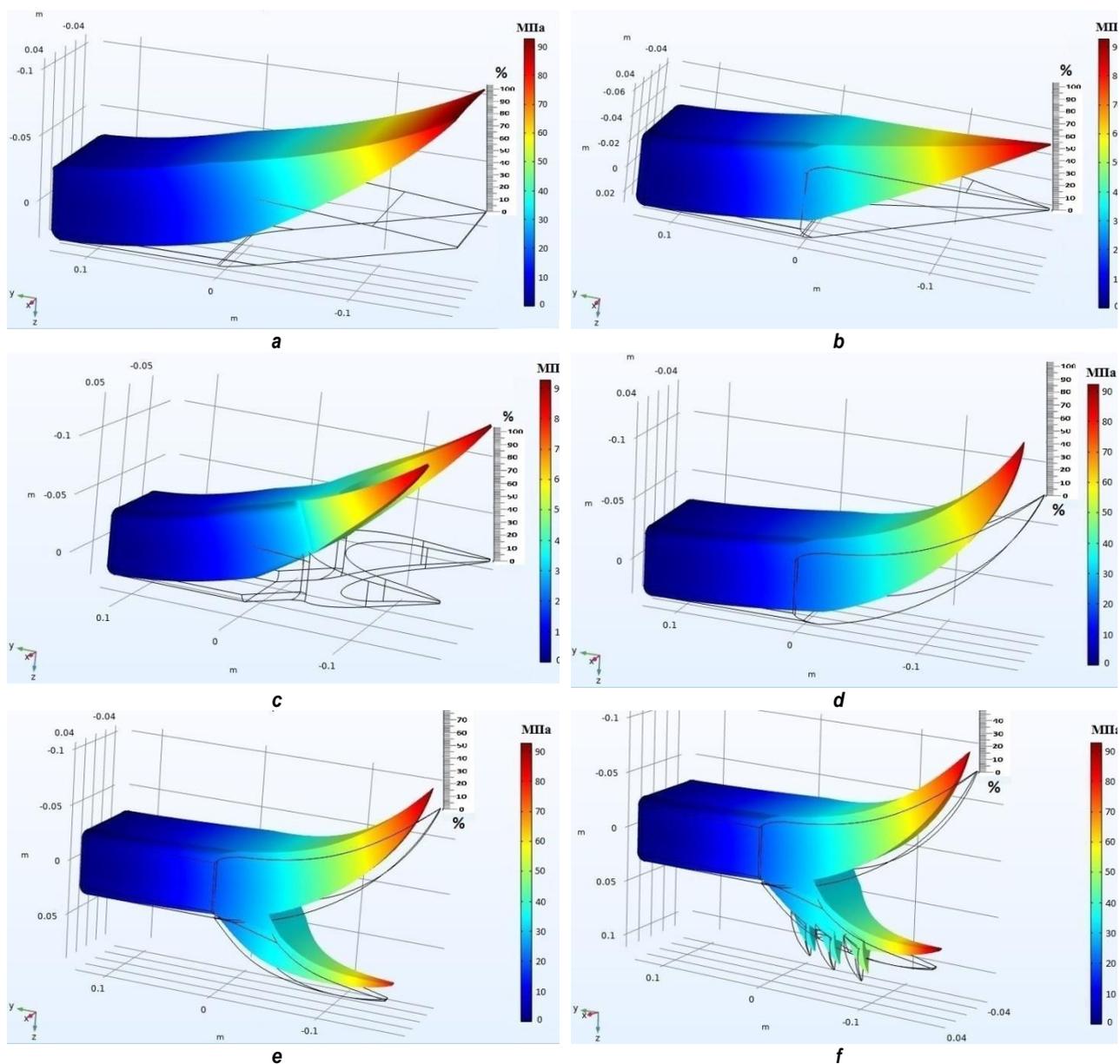


Рис. 6. Распределение продольных упругих внутренних напряжений и деформаций в зубьях моделей при работе на твердых грунтах: а – стандартный; б – скальный; с – рыхлитель; д – криволинейный; е – криволинейный с рыхлителем; ф – криволинейный с усиленным рыхлителем

Fig. 6. Distribution of longitudinal internal elastic stresses and deformations in the bucket teeth of models operating in hard soils: a – standard long; b – rock chisel; c – ripper (Twin Tiger); d – curved (penetration); e – curved tooth with a ripper; f – curved tooth with a reinforced ripper

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На основании вышеизложенного можно сделать следующий вывод, что при разработке мягких грунтов целесообразно применять зуб-рыхлитель, а при разработке горных пород и тяжелых грунтов с многочисленными твердыми включениями, а так же при работе в условиях вечной мерзлоты, целесообразно применять комбинированные зубья с дополнительным зубом-рыхлителем, расположен-

ным на нижней поверхности основного зуба (см. рис. 3).

Это позволит частично увеличить производительность землеройных машин, несколько увеличить объемы выполняемых работ, уменьшить экономические затраты на ремонт рабочего оборудования, а также позволит работать машинам в широком по твердости диапазоне разнообразных грунтов и пород, не меняя рабочий орган.

Список источников

1. Потехин В.М. Землеройная машина, виды и типы // СМИ «Вторая индустриализация России» [Электронный ресурс]. URL: <https://xn--80aaaftebbc3auk2aepkhr3ewjpa.xn--p1ai/zemleroyrnaya-mashina-vidyi-i-tipyi/> (02.05.2022).
2. Shehadeh A., Alshboul O., Tatari O., Alzubaidi M.A., El-Sayed Salama A.H. Selection of heavy machinery for earthwork activities: a multi-objective optimization approach using a genetic algorithm // *Alexandria Engineering Journal*. 2022. Vol. 61. Iss. 10. P. 7555–7569. <https://doi.org/10.1016/j.aej.2022.01.010>.
3. Valtonen K., Keltamäki K., Kuokkala V.-T. High-stress abrasion of wear resistant steels in the cutting edges of loader buckets // *Tribology International*. 2018. Vol. 119. P. 707–720. <https://doi.org/10.1016/j.triboint.2017.12.013>.
4. Bošnjak S.M., Arsić M.A., Gnjatović N.B., Milenović I.L.J., Arsić D.M. Failure of the bucket wheel excavator buckets // *Engineering Failure Analysis*. 2018. Vol. 84. P. 247–261. <https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2017.11.017>.
5. Mohajeri M.J., Bergh A.J., Jovanova J., Schott D.L. Systematic design optimization of grabs considering bulk cargo variability // *Advanced Powder Technology*. 2021. Vol. 32. Iss. 5. P. 1723–1734. <https://doi.org/10.1016/j.apr.2021.03.027>.
6. Guevara J., Arevalo-Ramirez T., Yandun F., Torres-Torriti M., Cheein F.A. Point cloud-based estimation of effective payload volume for earthmoving loaders // *Automation in Construction*. 2020. Vol. 117. P. 103207. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2020.103207>.
7. Mal B.C. Chapter 1 - Pond construction machinery // *Aquacultural Facilities and Equipment*. 2021. P. 1–22. <https://doi.org/10.1016/B978-0-323-85691-1.00007-6>.
8. Botyan E., Pushkarev A. Improving the methodology of choosing machinery models for the formation of an excavator and vehicle fleet during the modernization of a mining transport system, with account for the Arctic specifics // *Transportation Research Procedia*. 2021. Vol. 57. P. 106–112. <https://doi.org/10.1016/j.trpro.2021.09.031>.
9. Keleş A., Yildirim M. Improvement of mechanical properties by means of titanium alloying to steel teeth used in the excavator // *Engineering Science and Technology, an International Journal*. 2020. Vol. 23. Iss. 5. P. 1208–1213. <https://doi.org/10.1016/j.jestch.2019.12.003>.
10. Li Xinggao, Yuan Dajun, Jiang Xingqi, Wang Fei. Damages and wear of tungsten carbide-tipped rippers of tunneling machines used to cutting large diameter reinforced concrete piles // *Engineering Failure Analysis*. 2021. Vol. 127. P. 105533. <https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2021.105533>.
11. Liu Yi, Dai Feng. A review of experimental and theoretical research on the deformation and failure behavior of rocks subjected to cyclic loading // *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*. 2021. Vol. 13. Iss. 5. P. 1203–1230. <https://doi.org/10.1016/j.jrmge.2021.03.012>.
12. Mishra A.K., Aryal B. Operational maintenance analysis of actively utilized road construction equipments // *Materials Today: Proceedings*. 2021. Vol. 57. P. 256–264. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2021.01.051>.
13. Дэлэг Д., Ванчинжав С., Пурэвдорж Н. Исследование самозатачивания зуба ковша экскаватора // *Горный информационно-аналитический бюллетень*. 2008. Iss. S1. С. 402–416.
14. Armstrong M., Lagos T., Emery X., Homem-de-Mello T., Lagos G., Sauré D. Adaptive open-pit mining planning under geological uncertainty // *Resources Policy*. 2021. Vol. 72. P. 102086. <https://doi.org/10.1016/j.resourpol.2021.102086>.
15. Кадыров С.М., Шукуров Р.У., Ишунин А.К. Численный метод расчета долговечности режущих органов землеройных машин // *Узбекский журнал нефти и газа*. 2000. № 3. С. 43–48.
16. Шукуров Р.У. Биомеханическое моделирование в создании режущих органов землеройных машин // *Строительные и дорожные машины*. 2001. № 3. С. 37–39.
17. Густов Ю.И., Шукуров Р.У. Биомеханическое моделирование в строительной технике // *Строительные материалы и оборудование технологии XXI века*. 2007. № 12. С. 46–47.
18. Густов Ю.И., Шукуров Р.У., Воронина Ю.В. Биомеханическое моделирование в землеройной технике // *Новые материалы и технологии в машиностроении*. 2008. № 7. С. 16–19.
19. Таджиходжаева М.Р., Шермухамедов А.А. Экскаватор с адаптирующимися зубьями ковша при разработке каменных грунтов // *Подъемно-транспортные, строительные, дорожные, путевые машины и робототехнические комплексы: сб. докл. XXIII Московской Международ. межвузовской науч.-техн. конф. студентов, магистрантов, аспирантов и молодых ученых (г. Москва, 4 апреля 2019 г.)*. М.: МИСИ – МГСУ, 2019. С. 412–416.
20. Бочаров В.С., Козбагаров Р.А. Адаптация бульдозерного оборудования к изменению грунтовых условий // *Особенности проектирования строительства и эксплуатации автомобильных дорог в Восточно-Сибирском регионе: матер. Междунар. науч.-техн. конф. (г. Иркутск, 23 мая 1998 г.)*. Иркутск: ИрГТУ, 1998. С. 221–225.

References

1. Potekhin V.M. Earthmoving machines, designs and types. *SMI "Vtoraya industrializaciya Rossii"*. Available from: <https://xn--80aaaftebbc3auk2aepkhr3ewjpa.xn--p1ai/zemleroyrnaya-mashina-vidyi-i-tipyi/> [Accessed 2nd May 2022]. (In Russ.).
2. Shehadeh A., Alshboul O., Tatari O., Alzubaidi M.A., El-Sayed Salama A.H. Selection of heavy machinery for earthwork activities: a multi-objective optimization approach using a genetic algorithm. *Alexandria Engineering Journal*. 2022;61(10):7555-7569.

<https://doi.org/10.1016/j.aej.2022.01.010>.

3. Valtonen K., Keltamäki K., Kuokkala V.-T. High-stress abrasion of wear resistant steels in the cutting edges of loader buckets. *Tribology International*. 2018;119:707-720. <https://doi.org/10.1016/j.triboint.2017.12.013>.

4. Bošnjak S.M., Arsić M.A., Gnjatović N.B., Milenović I.L.J., Arsić D.M. Failure of the bucket wheel excavator buckets. *Engineering Failure Analysis*. 2018;84:247-261. <https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2017.11.017>.

5. Mohajeri M.J., Bergh A.J., Jovanova J., Schott D.L. Systematic design optimization of grabs considering bulk cargo variability. *Advanced Powder Technology*. 2021;32(5):1723-1734. <https://doi.org/10.1016/j.apr.2021.03.027>.

6. Guevara J., Arevalo-Ramirez T., Yandun F., Torres-Torriti M., Cheein F.A. Point cloud-based estimation of effective payload volume for earthmoving loaders. *Automation in Construction*. 2020;117:103207. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2020.103207>.

7. Mal B.C. Chapter 1 - Pond construction machinery. *Aquacultural Facilities and Equipment*. 2021;1-22. <https://doi.org/10.1016/B978-0-323-85691-1.00007-6>.

8. Botyan E., Pushkarev A. Improving the methodology of choosing machinery models for the formation of an excavator and vehicle fleet during the modernization of a mining transport system, with account for the Arctic specifics. *Transportation Research Procedia*. 2021;57:106-112. <https://doi.org/10.1016/j.trpro.2021.09.031>.

9. Keleş A., Yildirim M. Improvement of mechanical properties by means of titanium alloying to steel teeth used in the excavator. *Engineering Science and Technology, an International Journal*. 2020;23(5):1208-1213. <https://doi.org/10.1016/j.jestech.2019.12.003>.

10. Li Xinggao, Yuan Dajun, Jiang Xingqi, Wang Fei. Damages and wear of tungsten carbide-tipped rippers of tunneling machines used to cutting large diameter reinforced concrete piles. *Engineering Failure Analysis*. 2021;127:105533. <https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2021.105533>.

11. Liu Yi, Dai Feng. A review of experimental and theoretical research on the deformation and failure behavior of rocks subjected to cyclic loading. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*. 2021;13(5):1203-1230. <https://doi.org/10.1016/j.jrmge.2021.03.012>.

12. Mishra A.K., Aryal B. Operational maintenance analysis of actively utilized road construction equipments. In: *Materials Today: Proceedings*. 2021;57:256-264.

<https://doi.org/10.1016/j.matpr.2021.01.051>.

13. Deleg D., Vanchinzhav S., Purevdorzh N. Study of excavator bucket tooth self-sharpening. *Gornyj informacionno-analiticheskiy byulleten' = Mining informational and analytical bulletin*. 2008;S1:402-416. (In Russ.).

14. Armstrong M., Lagos T., Emery X., Homem-de-Mello T., Lagos G., Sauré D. Adaptive open-pit mining planning under geological uncertainty. *Resources Policy*. 2021;72:102086. <https://doi.org/10.1016/j.resourpol.2021.102086>.

15. Kadyrov S.M., Shukurov R.U., Ishunin A.K. Numerical method to calculate earth-moving machine cutting body durability. *Uzbekskij zhurnal nefti i gaza*. 2000;3:43-48. (In Russ.).

16. Shukurov R.U. Biomechanical modeling for earth-moving machine cutting body design. *Stroitel'nye i dorozhnye mashiny*. 2001;3:37-39. (In Russ.).

17. Gustov Yu.I., Shukurov R.U. Biomechanical modeling of construction equipment. *Stroitel'nye materialy i oborudovanie tekhnologii XXI veka*. 2007;12:46-47. (In Russ.).

18. Gustov Y.I., Shukurov R.U., Voronina Y.V. Biomechanical modeling of earthmoving equipment. *Novye materialy i tekhnologii v mashinostroenii*. 2008;7:16-19. (In Russ.).

19. Tadzhihodzhaeva M.R., Shermuhamedov A.A. Excavator with adaptable bucket teeth in stony soil development. In: *Pod'emno-transportnye, stroitel'nye, dorozhnye, putevye mashiny i robototekhnicheskie komplekсы: sbornik dokladov XXIII Moskovskoj Mezhdunarodnoj mezhvuzovskoj nauchno-tekhnicheskoy konferencii studentov, magistrantov, aspirantov i molodyh uchenyh = Lifting and transport, construction, road, track machines and robotic complexes. Collected reports of the 23^d Moscow International Inter-University Scientific and Technical Conference of students, undergraduates, postgraduates and young scientists*. 4 April 2019, Moscow. Moscow: MISI – Moscow State University of Civil Engineering; 2019, p. 412-416. (In Russ.).

20. Bocharov B.C., Kozbagarov P.A. Bulldozer equipment adjustment to changes in soil conditions. *Osobennosti proektirovaniya stroitel'stva i ekspluatatsii avtomobil'nyh dorog v Vostochno-Sibirskom regione: materialy Mezhdunarodnoj nauchno-tekhnicheskoy konferencii = Design features of highway construction and operation in the East Siberian region: materials of the International scientific and technical conference*. 23 May 1998, Irkutsk, Irkutsk: Irkutsk National Research Technical University; 1998, p. 221-225. (In Russ.).

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Осипов Артур Геннадьевич,

к.т.н., доцент,

доцент кафедры конструирования и стандартизации в машиностроении,

Иркутский национальный исследовательский технический университет,

664074, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 83, Россия

✉ arthur.osipov@rambler.ru

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Artur G. Osipov,

Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor,

Associate Professor of the Department of Design and Standardization in Mechanical Engineering,

Irkutsk National Research Technical University,

83 Lermontov St., Irkutsk 664074, Russian Federation

✉ arthur.osipov@rambler.ru

Васечкин Ульянов Александрович,
студент,
Иркутский национальный исследовательский
технический университет,
664074, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 83, Россия
ulyan.vase4kin@ya.ru

Ulyan A. Vasechkin,
Student,
Irkutsk National Research Technical University,
83 Lermontov St., Irkutsk 664074, Russian Federation
ulyan.vase4kin@ya.ru

Вклад авторов

Все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации.

Contribution of the authors

The authors contributed equally to this article.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Conflict of interests

The authors declare no conflicts of interests.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

The final manuscript has been read and approved by all the co-authors.

Информация о статье

Статья поступила в редакцию 20.04.2022; одобрена после рецензирования 05.09.2022; принята к публикации 08.02.2023.

Information about the article

The article was submitted 20.04.2022; approved after reviewing 05.09.2022; accepted for publication 08.02.2023.