

УДК 69.002.5

**И. В. Лесковец, канд. техн. наук, доц.****ИСТОРИЯ И ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ ЗЕМЛЕРОЙНОГО ОБОРУДОВАНИЯ ОТВАЛЬНОГО ТИПА**

В статье анализируются исторические особенности развития рабочего оборудования для выполнения земляных работ. Отмечается, что, несмотря на большое количество исследований, процессы копания грунта изучены не полностью. Основой для возникновения теории копания грунтов являются экспериментальные исследования. На базе экспериментов возникли теоретические предпосылки для расчетов параметров рабочего оборудования. Изучение особенностей рабочих процессов позволило выявить основные зависимости, характеризующие процессы копания грунта. Развитие основ теории копания грунтов дает возможность в настоящее время выполнять проектировочные расчеты параметров рабочего оборудования с использованием современных вычислительных технологий. В соответствии с современными тенденциями перспективным направлением является использование мультимедийных технологий с целью визуализации поведения рабочего оборудования и грунта, что позволяет сопоставить происходящие процессы с численной и графической информацией, выявляющей наиболее оптимальные параметры рабочего оборудования.

**Введение**

Объемы строительных работ в Республике Беларусь неуклонно возрастают. Это связано с выполнением программ строительства жилья и «Дороги Беларуси». Появление новых технологий строительства, новых строительных материалов, в целом удешевляющих строительное производство, не снижает объемов земляных работ как при строительстве зданий и сооружений, так и при строительстве дорог. При проведении земляных работ бульдозер является незаменимой машиной для разравнивания и предварительного уплотнения грунта, ПГС, щебня, гравия.

**Экспериментальные исследования**

Копание грунта – один из наиболее распространенных, но и недостаточно изученных процессов. Активное изучение этого процесса начато в 20–30-е гг. XX в. и ведется по настоящее время. Это связано с тем, что процесс является многостадийным и каждая стадия имеет свои существенные отличия. Над теоретическими основами резания и копания грунтов отвальными рабочими органами работали многие ученые (И. Я. Айзеншток [1], В. И. Баловнев [2],

Ю. А. Ветров [3, 4], М. И. Гальперин [5], Н. Г. Домбровский [6], А. Н. Зеленин [7, 8], А. С. Кананьян [9], Г. И. Клиопа [10], П. С. Кузьмин [11], А. С. Кондра [12], С. Н. Максимов [13], Н. Н. Маслов [14], С. И. Мигин [15], М. Х. Пигулевский [16], И. С. Сегаль [17], В. П. Станевский [18], В. П. Тяжелов [19], Н. Д. Устинкин [20], Д. И. Федоров [21], М. И. Эстрин [22]).

Большое значение в исследуемой области имеют работы В. П. Горячкина [23], М. Н. Гольдштейна [24], М. И. Подшеколдина [25], И. П. Прокофьева [26], М. И. Филатова [27], в области механики грунтов С. С. Голушкевича [28], В. В. Соколовского [29], Н. А. Цытовича [30]. В 20–50-е гг. XX в. учеными проведено множество экспериментальных исследований процессов резания и копания грунтов, что позволило выявить основные закономерности и построить расчетные схемы для определения сопротивлений перемещению землеройных машин при проведении технологических операций.

Исследователями отмечено, что все землеройные машины в процессе разработки грунта преодолевают комплексное сопротивление, называемое сопротивлением копания. Вскрыты за-

кономерности в определении сопротивлений копанию [3, 6, 7] как суммы трех основных составляющих: сопротивление грунта резанию; сопротивление перемещению призмы волочения; сопротивление заполнению ковша (у ковшовых машин) либо сопротивление перемещению стружки вверх по отвалу, либо сквозь призму волочения (для машин с отвальным рабочим органом).

Многими исследователями, в частности Н. Г. Домбровским [6], Ю. А. Ветровым [7], установлено, что сила сопротивления резанию является наиболее весомой и составляет от 42 до 83 % в сумме сопротивлений копанию при применении разных рабочих органов в различных условиях. На основании экспериментальных данных устанавливаются значения сил сопротивления резанию и сопротивления копанию, предлагается применение расчетных зависимостей с учетом коэффициента, характеризующего сопротивление копанию. Отмечается, важность **уточнения определения величин и закономерностей сил сопротивления резанию и копанию, что должно в наибольшей степени способствовать усовершенствованию и повышению эффективности землеройных машин.**

Первым уравнение для расчета сил, действующих на плуг, предложил В. П. Горячкин [23], однако недостатки, присущие предложенному подходу, и отличия условий работы плуга от рабочих органов землеройных машин, работающих по принципу прямоугольного резания, ограничивают применение формулы В. П. Горячкина для непосредственных расчетов землеройных машин.

Большое значение для непосредственных расчетов имеют исследования Н. Г. Домбровского [6], где внимание уделялось практическому определению значений коэффициентов для определения сил сопротивления копанию, причем процесс копания рассматривался как совокупность процессов резания,

сопротивления перемещению призмы волочения, сопротивления заполнению ковша и сопротивления перемещению ковша по грунту, когда это имеет место. Рабочее сопротивление при перемещении ковша предложено Н. Г. Домбровским определять как

$$P = kbh, \quad (1)$$

где  $k$  – удельное сопротивление копанию данного грунта данной машиной, принимаемое не зависящим от геометрических условий процесса;  $b$  – ширина резания;  $h$  – высота резания. Впоследствии самим же Н. Г. Домбровским отмечалось, что постоянство удельного сопротивления копанию для каждой машины на каждом грунте необходимо рассматривать как условный расчетный прием.

В реальности, как установлено многими исследователями [6, 7], сила сопротивления копанию как сумма составляющих сил зависит от сочетаний различных факторов, среди которых геометрические параметры рабочего оборудования и параметры, характеризующие состояние грунта.

В середине XX в. (1948–1950) И. Я. Айзеншток сопоставил три метода для определения силы резания грунта, полученные на основе теории В. В. Соколовского, способа Ш. Кулона и формулы И. А. Зворыкина. На основе проведенного анализа была получена экспериментально формула, уточняющая зависимость, предложенную Н. Г. Домбровским, но учитывающая сцепление грунта, угол наклона площадки сдвига грунта, угол затупления ножа, угол внутреннего трения грунта, угол трения грунта по ножу.

Исследования, проведенные А. Н. Зелениным, посвящены определению влияния геометрических параметров рабочего оборудования на процесс резания грунтов. Им установлено, что на характеристики процесса резания оказывает существенное влияние со-

стояние грунта и предложено считать, что сопротивление резанию пропорционально работе внедрения в грунт плотного конструктива ДорНИИ. Впервые при определении сил сопротивления резанию применяется ударник ДорНИИ. С помощью ударника определяется категория грунта, от которой зависит его удельное сопротивление резанию. А. Н. Зелениным предложены зависимости, позволяющие определять силу сопротивления резанию, учитывающую число ударов ударника ДорНИИ при его погружении в грунт, толщину и ширину среза, угол резания, коэффициент, характеризующий влияние зубьев, коэффициент, учитывающий число заблокированных сторон среза.

Существенный вклад внес в развитие теории резания Ю. А. Ветров. Свои исследования он посвятил изучению влияния на силы сопротивления резанию грунтов износа и затупления режущего инструмента, пространственности взаимодействия режущего инструмента с грунтом, стружкообразования во время резания грунтов, взаимодействия элементных ножей, из которых составлен режущий орган. Им исследованы закономерности колебаний сил сопротивления резанию грунта, выявлены возможности использования достижений механики грунтов для описания закономерностей их резания. Во время научных исследований Ю. А. Ветровым проведено огромное количество экспериментов по определению сил сопротивления грунтов резанию. Проведенные исследования позволили Ю. А. Ветрову считать силу сопротивления резанию пропорциональной толщине среза и определять ее как

$$P = p_{св}bh, \quad (2)$$

где  $p_{св}$  – удельная сила свободного резания грунта, Па, определяемая физико-механическими свойствами разрабатываемого грунта: сцеплением, внешним и внутренним трением.

Развитие математических методов и их применение при решении практических задач, в частности, в области теории моделирования и подобия, положили начало использованию этих методов при проектировании техники для земляных работ. Данные работы базировались на трудах авторов В. Н. Бусленко [31], В. А. Веникова [32], Е. С. Вентцеля [33], А. А. Гухмана [34], И. Езекиэла [35], В. А. Лисичкина [36], Э. Янча [37].

### *Основы математического моделирования*

Научным трудам, посвященным моделированию рабочего оборудования землеройных машин, предшествовало большое количество работ, основанных на экспериментальных исследованиях. Количество проведенных опытов исчисляется десятками тысяч. Например, опыты по отбору проб грунта проводились практически на всей территории СССР. Они были ориентированы на установление разных зависимостей и величин. В частности, А. Н. Зеленин [7] утверждал, что между усилием резания и числом ударов плотного конструктива ДорНИИ существует прямо пропорциональная зависимость, причем на ее величину не влияют ни гранулометрический состав, ни влажность, ни другие параметры грунта. С использованием данных, полученных Н. А. Цытовичем [30], М. Л. Шейковым, и теории статистики сыпучей среды В. В. Соколовского [29] проводятся работы по определению сопротивления грунтов сдвигу.

Огромное количество исследований ученых того времени, в том числе И. А. Недорезова [38], К. А. Артемьева [39], а также Т. М. Гаджиева, А. А. Яркина, З. Е. Гарбузова, Л. В. Красильникова, Г. Н. Карасева и др., позволило накопить громадный практический материал, хотя сами исследователи отмечали, что, несмотря на громоздкость конечных формул и на то, что результаты вычислений нередко бывают далеки от

конечных истин, этот материал и сегодня помогает отрабатывать правильную методику расчета усилий резания аналитическим путем.

Последующие исследования ученых в направлении совершенствования бульдозерного оборудования развивались путем определения оптимальных характеристик на основе выбора рациональных параметров технико-экономических показателей. Многие исследования посвящены отвальным и ковшовым рабочим органам. Комплексный анализ различных направлений исследований позволяет выявить наиболее перспективные пути. Исследованиями в анализируемых областях занимались Л. А. Хмара, В. В. Басий, М. И. Деревянчук [65], Е. И. Берестов [41], В. Н. Бондарь [42] К. А. Артемьев [39], В. Л. Баладинский [43], В. Г. Белокрылов [44].

Моделированию рабочих процессов строительных и дорожных машин уделялось внимание ведущими учеными этой области А. Н. Зелениным, В. И. Баловневым, К. А. Артемьевым, Ю. А. Ветровым еще в середине XX в. Однако уровень развития вычислительной техники не предполагал использования методов, основанных на дифференциальном исчислении. Элементная база существующих в то время ЭВМ не давала возможности создания удобного пользовательского интерфейса, оперативного изменения исходных данных модели, анализа и обработки графической информации [45].

В настоящее время применение имитационных моделей может привести к существенному сокращению затрат на проектирование и к значительному улучшению характеристик машин. Разработка универсальной, точной и экономичной модели машины – это сложная задача, требующая от исследователя высокой квалификации, больших затрат времени, знаний разнообразных областей исследований. Однако именно таким способом можно получить представление о поведении машины и про-

вести ее анализ на стадии проектирования, что особенно ценно при выборе основных параметров, компоновке систем, проектировании систем управления.

При проведении любого эксперимента, в том числе и компьютерного, следует установить структуру системы и выделить факторы варьирования, изменяя значения которых необходимо анализировать поведение модели и ее различных характеристик. Например, для моделирования рабочего оборудования можно применять подходы, когда структура модели соответствует структуре исследуемой системы. Такой подход предлагался некоторыми исследователями, например В. П. Тарасиком [46], Е. В. Кузнецовым [47]. Ими же предлагалось использовать имитационные модели по структурам данных и методам решений, соответствующие физическим моделям и процессам.

Примеры формализации и идентификации структурных схем рабочего оборудования бульдозеров с использованием математических методов теории графов приведены А. Г. Савельевым и Е. В. Дзюбан. Рассматривая проблемы автоматизации выбора основных параметров бульдозера, необходимо отметить работы этих авторов как пионерные в направлении формализации параметров рабочего оборудования бульдозера.

Большое значение для теоретического обоснования процессов резания и копания грунтов имеют работы К. А. Артемьева, где рассматриваются проблемы использования теории предельного равновесия сыпучей среды для определения сопротивления грунтов резанию и копанию [39].

Важные выводы в своих работах, посвященных разработке методик определения основных параметров отвалов и тяговых расчетов, сделал И. А. Недорезов [38].

Е. И. Берестов [41] обосновал представления о механизме стружкообразования при взаимодействии рабочих органов землеройно-транспортных ма-

шин с грунтом в режиме послойной разработки на основании анализа картины разрушения грунта, разработал теоретические основы моделирования процесса копания грунта ЗТМ, работающих в режиме послойной разработки, учитывающих особенности копания плоским, отвальным и ковшовым рабочим органами.

Анализируя работы исследователей в области копания грунтов различными рабочими органами, следует отметить, что получаемые результаты весьма адекватны для отдельных случаев, рассматриваемых авторами исследований. На сегодняшний день общая теория, позволяющая получить на стадии проектирования результаты, соответствующие реальным в широком диапазоне параметров рабочего оборудования и грунта, разработана Е. И. Берестовым в Могилевском машиностроительном институте. Однако в данной теории рассматривается отвал без взаимосвязи его с машиной, что вносит некоторые ограничения в использовании полученных результатов.

### **Заключение**

Проведенный анализ показывает, что на текущий момент в области проектирования гусеничных бульдозеров мало методов, позволяющих оценить работу машины как комплекса взаимодействующих систем и механизмов. Несмотря на значительное количество работ, посвященных моделированию процессов работы бульдозера, не определены основы формализации механизмов и систем машины, учитывающие их взаимодействие и позволяющие составить формализованное описание в структурированном и параметризованном виде бульдозера как комплекса взаимодействующих систем.

Для определения параметров рабочего оборудования бульдозера, несмотря на наличие теоретических основ, позволяющих провести комплексный

анализ рабочих процессов для различных стадий копания, используются статические зависимости, определяющие характеристики процесса копания для усредненных параметров процесса. Выбор параметров рабочего оборудования на основании полученных данных не всегда обоснован и не гарантирует их оптимальности.

Большую помощь при проектировании гусеничных бульдозеров может оказать САПР, позволяющая провести анализ работы машины как комплекса взаимодействующих систем и механизмов, дающая возможность моделирования технологического процесса работы бульдозера с целью выбора его оптимальных параметров с точки зрения комплекса показателей, таких как производительность, экономичность, надежность, долговечность и др.

Таким образом, перспективным направлением в исследуемой области является разработка теоретических основ систем автоматизированного проектирования отвальных рабочих органов. Перспективные САПР позволяют обосновать выбор основных параметров машины как комплекса систем взаимодействующих при выполнении технологических операций.

### **СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ**

1. **Айзеншток, И. Я.** К построению физической теории резания грунтов / И. Я. Айзеншток. – М. : АН СССР, 1951. – С. 76–103.
2. **Баловнев, В. И.** Моделирование процессов взаимодействия со средой рабочих органов дорожно-строительных машин / В. И. Баловнев. – М. : Высш. шк., 1981. – 336 с.
3. **Ветров, Ю. А.** Сопrotивление грунтов резанию / Ю. А. Ветров. – Киев : Изд-во Киевского ун-та, 1962. – 96 с.
4. **Ветров, Ю. А.** Расчеты сил резания и копания грунтов / Ю. А. Ветров. – Киев : Изд-во Киевского ун-та, 1965. – 123 с.
5. **Гальперин, М. И.** Механика резания известняков / М. И. Гальперин. – М. : Филиал ВИНТИ АН СССР. – 98 с.
6. **Домбровский, Н. Г.** Землеройные машины / Н. Г. Домбровский, С. А. Панкратов. – М. : Гостройиздат, 1961. – 321 с.

7. **Зеленин, А. Н.** Физические основы теории резания грунтов / А. Н. Зеленин. – М. : АН СССР, 1950. – 187 с.
8. **Зеленин, А. Н.** Основы разрушения грунтов механическими способами / А. Н. Зеленин. – М. : Машиностроение, 1968. – 198 с.
9. **Кананьян, А. С.** Экспериментальное исследование разрушения песчаного основания вертикальной нагрузкой / А. С. Кананьян // Тр. науч.-исслед. ин-та оснований и фундаментов. «Механика грунтов». – М. : Госстройиздат, 1954. – С. 134–145.
10. **Клиопа, Г. И.** Влияние скорости на усилие резания грунта / Г. И. Клиопа. – М. : Автотрансиздат, 1958. – 134 с.
11. **Кузьмин, П. С.** Определение коэффициента трения в движении сыпучих тел и кусковых материалов / П. С. Кузьмин // Тр. ЛИИВТ. – 1936. – Вып. 7. – 212 с.
12. **Кондра, А. С.** Исследование липкости грунтов и средства ее устранения / А. С. Кондра // Вопросы теории и эксплуатации строительных машин : сборник. – Львов : Изд-во Львовского ун-та, 1964. – С. 43–56.
13. **Максимов, С. Н.** Сопротивление сдвигу слабоуплотненных глинистых пород / С. Н. Максимов // Гидротехническое строительство. – 1953. – № 9. – С. 17–20.
14. **Маслов, Н. Н.** Прикладная механика грунтов / Н. Н. Маслов. – М. : Машстройиздат, 1949. – 236 с.
15. **Мигин, С. И.** Экспериментальное исследование влияния влажности на сопротивление связного грунта сдвигу / С. И. Мигин // Информационные материалы ВНИИ водоснабжения, канализации, гидротехнических сооружений и инженерной геологии. – 1954. – № 1. – 54 с.
16. **Пигулевский, М. Х.** Физико-механические свойства рыхлых дорожных материалов / М. Х. Пигулевский. – М. : Транспечать, 1929. – 78 с.
17. **Сегаль, И. С.** К исследованию процессов резания и волочения сыпучих материалов в подъемно-транспортных установках / И. С. Сегаль // Сб. ст. Гинстальмост. – 1936. – Вып. 2. – С. 36–45.
18. **Станевский, В. П.** О физической сущности влияния скорости на силу резания грунтов / В. П. Станевский // Горные, строительные и дорожные машины : сборник. – Киев : Техника, 1966. – Вып. 4. – С. 15–19.
19. **Тяжелов, В. П.** Производство земляных работ в зимнее время / В. П. Тяжелов, Е. В. Шнипко. – М. : Госстройиздат, 1958. – 86 с.
20. **Устинкин, Н. Д.** Исследование сопротивления от сил инерции при резании грунта / Н. Д. Устинкин // Изв. вузов. Строительство и архитектура. – 1966. – № 3. – С. 43–47.
21. **Федоров, Д. И.** Рабочие органы землеройных машин / Д. И. Федоров. – М. : Машиностроение, 1977. – 288 с.
22. **Эстрин, М. И.** Исследование режимов резания грунта ножами грейдер-элеваторов. / М. И. Эстрин // Строительное и дорожное машиностроение. – 1956. – № 10. – С. 17–19.
23. Теория и производство сельскохозяйственных машин / В. П. Горячкин [и др.] // Теория и производство сельскохозяйственных машин. – М. : Сельхозгиз, 1936. – 256 с.
24. **Гольдштейн, М. Н.** Деформация земляного полотна и оснований сооружений при промерзании и оттаивании / М. Н. Гольдштейн. – М. : Трансжелдориздат, 1948. – 234 с.
25. **Подщеколдин, М. И.** Физико-механические свойства рыхлых дорожных материалов / М. И. Подщеколдин // Тр. ХАДИ. – 1954. – Вып. 16. – 212 с.
26. **Прокофьев, И. П.** Давление сыпучих тел и расчет подпорных стенок / И. П. Прокофьев. – М. : Госстройиздат, 1947. – 67 с.
27. **Филатов, М. И.** Основы дорожного грунтоведения / М. И. Филатов. – М. : Геотрансиздат, 1936. – 345 с.
28. **Голушкевич, С. С.** Статика предельного состояния сыпучих масс / С. С. Голушкевич. – М. : Гостехиздат, 1957. – 288 с.
29. **Соколовский, В. В.** Статика сыпучей среды / В. В. Соколовский. – М. : Гостехтеориздат, 1954. – 189 с.
30. **Цытович, Н. А.** Механика грунтов (краткий курс) / Н. А. Цытович. – 40-е изд., перераб и доп. – М. : Высш. шк., 1983. – 288 с.
31. **Бусленко, В. Н.** Моделирование сложных систем / В. Н. Бусленко. – М. : Наука, 1968. – 352 с.
32. **Веников, В. А.** Теория подобия и моделирования / В. А. Веников. – М. : Высш. шк., 1966. – 487 с.
33. **Вентцель, Е. С.** Исследование операций / Е. С. Вентцель. – М. : Наука, 1972. – 97 с.
34. **Гухман, А. А.** Введение в теорию подобия / А. А. Гухман. – М. : Высш. шк., 1973. – 295 с.
35. **Езекиэл, И.** Методы анализа корреляций и регрессий / И. Езекиэл, К. А. Фокс. – М. : Статистика, 1966. – 170 с.
36. **Лисичкин, В. А.** Отраслевое научно-техническое прогнозирование / В. А. Лисичкин. – М. : Экономика, 1972. – 68 с.
37. **Янч, Э.** Прогнозирование научно-технического прогресса / Э. Янч. – М. : Прогресс, 1974. – 220 с.
38. **Недорезов, И. А.** К методике определения основных параметров отвала и тягового расчета автогрейдеров / И. А. Недорезов // Строительные и дорожные машины. – 1962. – № 1. – С. 8–12.

39. **Артемьев, К. А.** О возможности использования теории предельного равновесия сыпучей среды для определения сопротивления грунтов резанию и копанию / К. А. Артемьев // Исследование и испытание дорожных и строительных машин : тр. СибАДИ. – Омск, 1975. – Вып. 56. – С. 3–8.

40. **Хмара, Л. А.** Анализ главных направлений совершенствования рабочего оборудования бульдозеров / Л. А. Хмара, В. В. Басий, М. И. Деревянчук // Строительные и дорожные машины. – 2005. – № 2. – С. 8–14.

41. **Берестов, Е. И.** Научные основы моделирования системы «Грунт – рабочее оборудование землеройных машин» в режиме полойной разработки : автореф. дис. ... д-ра техн. наук. – Могилев, 1998. – 404 с.

42. **Бондарь, В. Н.** Испытания бульдозерно-рыхлительного агрегата на базе трактора ДЭТ-320 / В. Н. Бондарь, Г. П. Мицын, А. Е. Новосельский // Строительные и дорожные машины. – 2005. – № 11. – С. 20–32.

43. **Баладинский, В. Л.** Исследование рабочих процессов землеройных машин / В. Л.

Баладинский, Ю. В. Пузырев // Горные, строительные, дорожные и мелиоративные машины : сб. ст. – Киев, 1986. – Вып. 39. – С. 3–7.

44. **Белокрылов, В. Г.** Взаимодействие ножа и ковша скрепера с грунтом / В. Г. Белокрылов // Исследование и испытание дорожных и строительных машин : тр. СибАДИ. – Омск, 1975. – Вып. 53. – С. 9–17.

45. **Сырецкий, Г. А.** Информатика. Фундаментальный курс. Т. I. Основы информатики и вычислительной техники : учебник для вузов / Г. А. Сырецкий. – СПб. : ВНУ-Санкт-Петербург, 2005. – 832 с.

46. **Тарасик, В. П.** Математическое моделирование технических систем : учебник / В. П. Тарасик. – Минск : Дизайн ПРО, 2004. – 640 с.

47. **Кузнецов, Е. В.** Обоснование и выбор параметров двигателя и трансмиссии пахотного гусеничного трактора тягового класса 30 кН : автореф. дис. ... канд. техн. наук. – Могилев : ММИ, 1994. – 25 с.

Белорусско-Российский университет  
Материал поступил 07.04.2011

**I. V. Leskovets**

### **The history and prospects of development of earth-moving equipment of the dumping type**

The paper analyzes historical peculiarities of the development of working equipment for doing earthwork. It is noted that despite the abundance of research, earth digging processes are not studied completely. Experimental research is the basis for the appearance of the earth digging theory. Based on the experiments, the theoretical background for calculating equipment parameters emerged. The study of peculiarities of working processes revealed basic dependences characterizing earth digging processes. Currently the development of fundamentals of the earth digging theory enables performing design calculations of the working equipment parameters by using up-to-date computation technologies. In accordance with modern tendencies the promising area is the usage of multimedia technologies with the purpose of visualization of working equipment and soil performance and it allows the comparison of ongoing processes with numerical and graphic information revealing the most optimal working equipment parameters.