

Министерство образования и науки РФ
Федеральное государственное бюджетное образовательное
учреждение высшего образования
«Сибирская государственная автомобильно-дорожная
академия (СибАДИ)»

Н.С. Галдин

**РАБОЧЕЕ ОБОРУДОВАНИЕ УДАРНОГО
ДЕЙСТВИЯ ДЛЯ УПЛОТНЕНИЯ ГРУНТА
ТРАМБОВАНИЕМ**

Монография

Омск
СибАДИ
2016

УДК 625.76:626.226
ББК 39.91-048.5
Г 15

Рецензенты:

д-р техн. наук, проф. П.А. Корчагин
д-р техн. наук Д. И. Чернявский (ОмГТУ)

Работа одобрена редакционно-издательским советом ФГБОУ ВО «СибАДИ» в качестве монографии.

Галдин, Н. С.

Г15 Рабочее оборудование ударного действия для уплотнения грунта трамбованием: монография.– Омск: СибАДИ, 2016. – 102 с.

Изложены основы теории и расчета гидроимпульсных средств механизации, используемых в качестве рабочего оборудования ударного действия для уплотнения грунта к дорожно-строительным машинам (ДСМ).

Проведен анализ конструкций гидроимпульсных устройств, используемых в качестве активных рабочих органов дорожно-строительных машин для уплотнения грунта трамбованием. Приведены перспективные схемы гидроударных устройств, для управления рабочим циклом которых используются блоки управления рабочим циклом с мембранными запорно-регулирующими элементами. Даются рекомендации по проектированию рабочего оборудования ударного действия для уплотнения грунта.

Книга будет полезна студентам механических специальностей вузов, магистрантам, аспирантам и инженерно-техническим работникам, занимающимся проектированием активных рабочих органов дорожно-строительных машин.

Ил. 64 . Табл. 20 . Библиогр.: 36 назв.

ВВЕДЕНИЕ

Темпы и качество строительных работ, производительность и условия труда в значительной степени зависят от улучшения структуры, технического уровня средств механизации и степени использования новой техники.

В строительных работах одними из наиболее трудоемких являются земляные работы. Специфические условия строительства увеличивают потребности в различном оборудовании для дорожно-строительных машин (ДСМ), в том числе и гидроударном импульсном.

Особенностью развития ДСМ на современном этапе является повышение рабочей эффективности, расширение универсальности применения. Последнее достигается благодаря применению широкой гаммы сменного навесного рабочего оборудования.

Ведущими многофункциональными строительными машинами в России и за рубежом являются гидравлический неполноповоротный и полноповоротный гидравлический экскаваторы.

Специфические условия строительства увеличивают потребности в различном оборудовании для одноковшовых гидравлических экскаваторов II...V размерных групп, в том числе и гидроимпульсном.

Гидроимпульсная техника (гидроударные устройства, гидромолоты, гидротрамбовки, гидропробойники и др.), основанная на применении в машинах ударного действия объемного гидропривода, позволяет осуществить принципиально новые решения научно-технических проблем в строительстве, горном деле и других отраслях.

Применение гидроударного рабочего оборудования на дорожно-строительных машинах, в первую очередь на гидравлических экскаваторах, повышает эффективность работы машин при уплотнении грунта, разработке мерзлого грунта, разрушении скальных пород, дорожных одежд, проходке скважин в грунте, забивании и извлечении свайных элементов и выполнении других видов работ.

Производительность активных (основанных на применении гидроударных устройств) рабочих органов дорожно-строительных машин во многом определяется правильным выбором конструктив-

ных, энергетических и рабочих параметров гидроударников с учетом назначения, выполняемых функций и применяемой базовой машины.

1. ГИДРОУДАРНЫЕ РАБОЧИЕ ОРГАНЫ ДОРОЖНО-СТРОИТЕЛЬНЫХ МАШИН

1.1. Активные рабочие органы дорожно-строительных машин, области применения гидроударных устройств

Наибольшее распространение среди существующих способов разработки грунтов получил механический. В зависимости от характера силового взаимодействия рабочего органа с разрабатываемым грунтом различают следующие его виды: разработка при малой скорости силового воздействия, ударное, вибрационное, высокоскоростное или их сочетание.

Активизация рабочих органов путем приложения различного рода импульсных нагрузок обеспечивает создание высоких динамических усилий, достаточных для эффективной разработки среды (мерзлого грунта, разрушения негабаритов, асфальтобетонных покрытий), уплотнения грунта /2 – 5, 7 – 10, 22, 23/.

В настоящее время благодаря простой и надежной конструкции большую известность получили гидромолоты, пневмомолоты, электромолоты различных типов, используемые для работы с грунтами (уплотнение, разрушение), с асфальтобетонными, железобетонными покрытиями и выполнения других видов работ. Основными параметрами гидромолотов, выполняющих указанные работы, являются: величина необходимой для разработки грунта энергии удара, частота ударов, ударная мощность.

Отдельную группу составляют машины с пневматическими, вибрационными, взрывными, газовыми устройствами, установленными на рабочие органы скреперов и бульдозеров. К ним следует отнести землеройно-транспортные машины с "газовой смазкой" конструкции МАДИ, ХАДИ и др. Преимуществом таких машин является возможность регулирования подачи газа, величин амплитуд и частот колебаний /4/.

Машины с активными рабочими органами (рис.1.1...1.4) находят все большее применение в различных областях строительства и

производства. Широкое распространение получают вибрационные конвейеры, виброгрохоты, вибропогрузатели свай, виброуплотнители грунта, виброударные механизмы для бурения, перфораторы различных типов, электро- и пневмотрамбовки, молотки и т.д. Однако методы расчета активных рабочих органов ДСМ с учетом видов выполняемой рабочим органом работы при разработке грунтов практически отсутствуют.

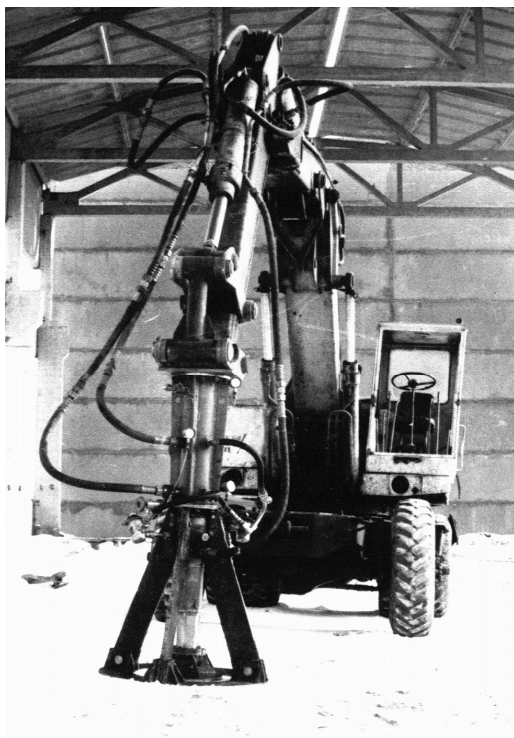


Рис. 1.1. Экскаватор ЭО-3322 с гидротрамбовкой



Рис. 1.2. Гидротрамбовка к экскаватору



Рис. 1.3. Зуб-рыхлитель к экскаватору ЭО-2621 В2

Гидропневматический молот НМ-330 (рис. 1.4) повышенной мощности (энергия удара 2000 Дж) разработан специально для экскаваторов типа ЭО-3323А, ЕК-14 и их аналогов. Применяется для разрушения бетонных и железобетонных конструкций, асфальтобетонных покрытий и других аналогичных работ.



Рис. 1.4. Гидромолоты НМ-330 и НМ-440

Гидропневматический молот НМ-440 (энергия удара 4000 Дж) предназначен для выполнения больших объемов работ на прочных материалах. Навешивается на экскаваторы типа ЭО-4225, ЭО-4121 (Ковров), ЭО-4321В (Киев), ЕК-18, ЕТ-25 (Тверь). Эффективная работа на рыхлении мерзлых грунтов.

Наличие механизмов с динамическим принципом взаимодействия рабочего органа с разрабатываемой средой говорит о необходимости создания методов расчета активных рабочих органов, выбора их рациональных параметров и конструирования таких машин и механизмов с учетом особенностей процесса взаимодействия рабочего органа с разрабатываемой средой.

В современных условиях для интенсификации производственных процессов в различных отраслях промышленности широко используются гидравлические ударные устройства, под которыми понимается механизм, в котором энергия жидкости генерируется в импульсы силы определенной частоты и интенсивности, воздействующие на некоторую обрабатываемую среду. Наибольшее применение они находят в качестве активных рабочих органов дорожно-строительных, горных и других машин /3, 10, 21, 27/.

Для разрушения небольших объемов прочных грунтов и асфальтобетонных дорожных покрытий, в том числе в стесненных местах и при реконструкции различных объектов, рекомендуется применять навесные гидравлические и гидропневматические молоты к экскаваторам П...V размерных групп. Монтаж и демонтаж гидромолота на экскаваторе практических трудностей не представляют и не требуют специальных приспособлений.

Гидромолот в общем виде состоит из корпуса, ударника (бойка), движущегося по направляющим корпуса, пневматического или гидравлического аккумулятора и сменного рабочего инструмента. Распределение жидкости у существующих гидромолотов осуществляется системой каналов в бойке и проточек в корпусе или золотниковым распределительным устройством.

Все типоразмеры гидромолотов, навешиваемых на экскаваторы П...V размерных групп, снабжаются съемным инструментом в виде трамбуемых плит для уплотнения грунтов.

Установлены преимущества применения навесных гидромолотов с уплотняющими плитами в стесненных местах строительства благодаря кинематическим особенностям управляемых стрел и руко-

ятей экскаваторов.

1.2. Классификация, структура гидроударных устройств

Гидравлические ударные устройства условно можно разделить на три группы: гидромеханические – привод ударной части (бойка) осуществляется от гидродвигателя (гидроцилиндра или гидромотора) через промежуточную механическую передачу; гидравлические (гидромолоты двойного действия) – движение ударной части происходит за счет рабочей жидкости, подаваемой насосом базовой машины; гидропневматические – взвод ударной части осуществляется рабочей жидкостью, а рабочий ход происходит за счет энергии сжатого газа пневмоаккумулятора.

Опыт создания гидромеханических ударных устройств весьма ограничен. Один из основных их недостатков – наличие сложной механической трансмиссии. Попытки повысить энергию удара влекут за собой резкое увеличение массы и габаритных размеров ударных устройств, что усложняет эксплуатацию оснащенных ими машин и ограничивает возможности их использования.

Недостатком гидравлических ударных устройств (вторая группа) является сложность конструкции, вызванная наличием большого количества гидроаппаратов (золотников, обратных клапанов и др.) в конструкции самого ударного устройства, что уменьшает их надежность в эксплуатации.

Достоинством гидромолотов двойного действия является наличие одного энергоносителя.

Преимущества гидропневматических ударных устройств заключаются в компактности, низкой металлоемкости на единицу энергии удара, простоте регулирования энергии удара изменением давления зарядки газа в пневмоаккумуляторе. Гидропневматические ударные устройства получили наибольшее распространение.

К классу гидропневматических относятся гидромолоты НМ-120, НМ-230, НМ-330, НМ-440 ОАО “Тверьтехоснастка” и другие.

Гидропневматическое ударное устройство, как и гидроударники других типов, характеризуется цикличностью функционирования – холостым ходом подвижной части (взводом бойка ударника), заканчивающимся фазой торможения и рабочим ходом бойка (нанесением удара по обрабатываемой среде).

Гидропневмоударное устройство имеет, как правило, три полости: газовую (пневмоаккумуляторную), взводящую и сливную. После окончания холостого хода взводящая полость соединяется со сливной и под действием энергии сжатого газа пневмоаккумулятора подвижные части (боек) гидропневмоударника совершают рабочий ход – нанесение удара. Полость взвода соединяется со сливной полостью при помощи распределительных устройств (блоков управления рабочим циклом): золотника, трубчатого клапана, втулки управления и др.

Полости взвода и пневмоаккумуляторная являются основными, обеспечивающими рабочий процесс гидроударника.

По способу освобождения взводящей полости от рабочей жидкости гидропневматические ударные устройства разделяют на два основных типа: с вытеснением рабочей жидкости в период рабочего хода непосредственно в сливную линию, с вытеснением рабочей жидкости в период рабочего хода в освобождающуюся сливную полость.

Первый тип гидроударных устройств конструктивно проще, так как включает только две основные полости. Гидроударные механизмы подобного типа применяют при незначительной энергии удара, так как при повышении энергии удара возрастают рабочие объемы жидкости, что увеличивает ее скорость в сливной гидролинии, потери давления и снижается КПД ударного устройства. Гидроударные устройства второго типа позволяют значительно снизить скорость жидкости в сливной гидролинии, тем самым улучшая энергетические параметры гидропневмоударников.

В России и странах СНГ на протяжении последних десятилетий сложились и успешно работают ряд научных школ по разработке гидроимпульсной техники и технологии.

В настоящее время известно большое число конструкций гидроударных устройств, в частности гидромолотов. Только в патентной литературе их насчитывается несколько сотен, и на этой базе могут быть разработаны разнообразные конструктивные решения [3, 21, 27, /.

Анализ рабочих процессов в гидравлических ударных устройствах, многочисленных даже на уровне схем, требует больших затрат труда и времени. Поэтому отыскание общих признаков, отражающих особенности структурообразования и функционирования механиз-

мов, по которым они могут быть объединены в группы, значительно упрощает их разработку.

Гидроимпульсная система (рис. 1.5) включает следующие основные элементы: источник питания (насос) базовой машины (манипулятора) и гидроударное устройство, состоящее из энергетического блока, блока управления рабочим циклом и инструмента /6/.

Под гидроударным устройством понимается механизм, в котором энергия подводимой к нему жидкости генерируется в импульсы силы определенной частоты и интенсивности, воздействующие на некоторую обрабатываемую среду.

Энергетический блок преобразует непрерывно подводимую от насоса энергию в дискретную энергию с большим значением ударной мощности. Энергетический блок включает корпусные детали, подвижные детали и рабочие полости. Блок управления рабочим циклом предназначен для управления преобразованием непрерывно подводимой энергии в периодические импульсы.

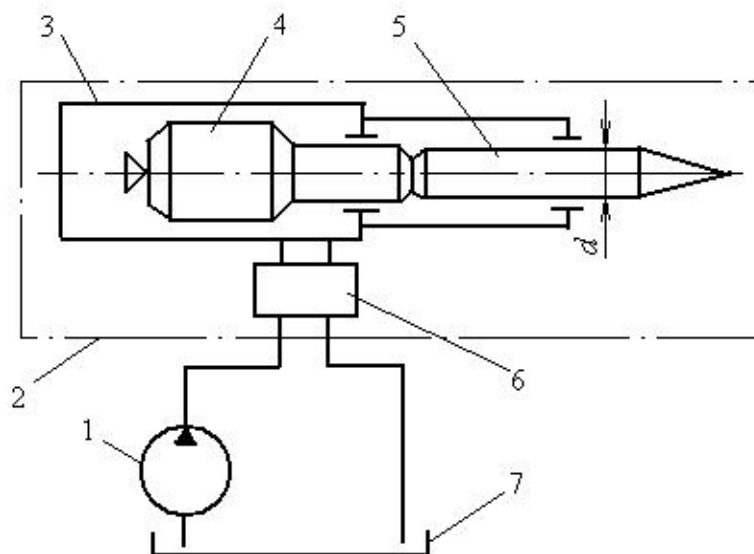


Рис.1.5. Схема гидроимпульсной системы:
1 – насос; 2 – гидроударное устройство; 3 – корпус; 4 – поршень боек;
5 – инструмент (d - диаметр хвостовика инструмента);
6 – блок управления; 7 – гидробак

1.3. Особенности беззолотниковых гидроударных устройств

Отличием беззолотниковых гидравлических ударных устройств, или гидроударных устройств с мембранными запорно-регулирующими элементами (МЗРЭ), разработанных в СибАДИ, яв-

ляется применение упругого запорно-регулирующего элемента в распределительном узле (блоке) управления рабочим циклом устройства. Распределительный узел обеспечивает изменение направления движения жидкости в гидроударнике при холостом ходе (взводе) бойка и при его рабочем ходе (разгоне).

В качестве упругого запорно-регулирующего элемента в различных конструкциях гидроударников могут использоваться цилиндрические оболочки, кольца, плоские пластины, выполняемые из различных материалов. Классификация распределительных узлов беззолотниковых гидроударников приведена на рис. 1.6.



Рис. 1.6. Классификация распределительных узлов беззолотниковых гидроударников

Первые конструкции беззолотниковых гидроударников включали цилиндрические упругие запорно-регулирующие элементы, устанавливаемые внутри корпуса гидроударника.

Конструктивная схема беззолотникового гидроударника с цилиндрическим запорно-регулирующим элементом /7/ представлена на рис. 1.7.

Гидроударник состоит из корпуса 1, подвижных частей 2, управляющей полости 3, стакана 4, цилиндрического упругого запорно-регулирующего элемента 5, пневмоаккумуляторной полости

А, взводящей полости В, сливной полости С, дросселей Д1 и Д2. Управляющая полость У образована наружной поверхностью упругого элемента 5 и внутренней поверхностью стакана 4.

На поршне взводящей полости имеется кольцевая проточка управления упругим элементом. При холостом ходе подвижных частей (взводе бойка) происходит разобщение взводящей полости В и сливной С за счет перекрытия упругим запорно-регулирующим элементом 3 каналов В и С. В конце взвода управляющая полость У соединяется со сливной гидролинией через проточку на поршне взводящей полости В. Давление над упругим элементом 3 падает, он деформируется в радиальном направлении (расширяется), образуя кольцевой канал, который соединяет взводящую полость В со сливной С.

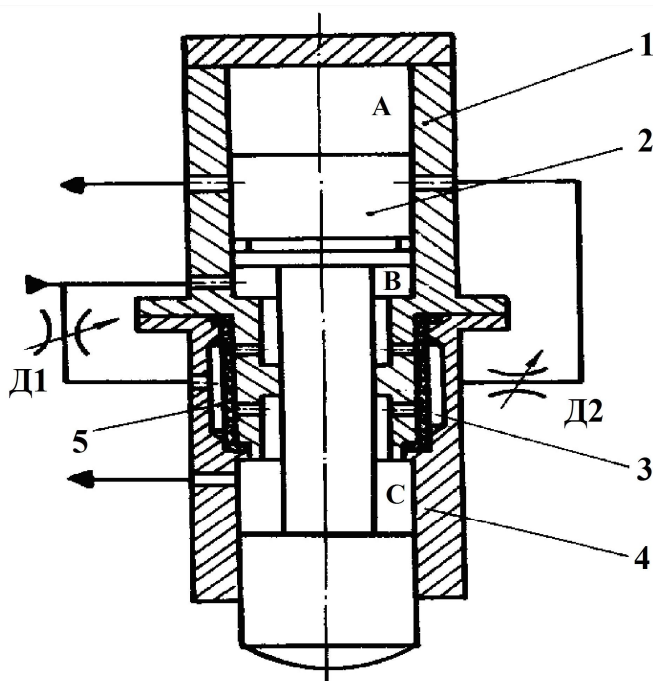


Рис. 1.7. Конструктивная схема беззолотникового гидроударника по а.с. № 863854:

- 1 – корпус; 2 – подвижные части; 3 – управляющая полость;
- 4 – стакан; 5 – цилиндрический упругий запорно-регулирующий элемент

За счет энергии сжатого газа пневмоаккумулятора А совершается рабочий ход подвижных частей, заканчивающийся ударом инструмента по обрабатываемому грунту.

Дроссели Д1 и Д2 являются регулировочными, обеспечивающими необходимый режим работы устройства. Далее рабочий цикл повторяется.

В последующих схемах беззолотниковых гидроударников распределительный узел управления рабочим циклом с цилиндрическим упругим запорно-регулирующим элементом располагается вне корпуса гидроударника отдельным модулем /7/.

Применение упругого запорно-регулирующего элемента для периодического сообщения взводящей и сливной полостей гидроударного устройства дает следующие преимущества по сравнению с ранее рассмотренными гидроударными устройствами:

- а) упрощается конструкция гидроударника;
- б) повышается технологичность конструкции;
- в) появляется возможность регулирования частоты ударов, энергии удара;
- г) повышается надежность гидроударника;
- д) снижаются требования к чистоте рабочей жидкости;
- е) улучшается ремонтоспособность.

1.4. Основные параметры гидроударных устройств

К основным параметрам гидроударников (гидромолотов) относятся:

- энергия единичного удара T ;
- масса подвижных частей (бойка) m ;
- частота ударов n ;
- эффективная (ударная) мощность $N_{уд}$;
- коэффициент полезного действия (КПД) η ;
- масса гидроударника M .

Значения приведенных параметров используются при проектировании гидромолотов.

Исходными данными для выбора и расчета основных параметров гидромолотов являются мощность насосной станции $N_{пр}$ (приводная) базовой машины и масса базовой машины.

Эффективная (ударная) мощность гидромолотов определяется из выражения $N_{уд} = T \cdot \frac{n}{60}$ (здесь n – количество ударов в минуту).

Энергия единичного удара определяется выражением

$$T = m \cdot V_1^2 / 2, \quad (1.1)$$

где m – масса подвижных частей; V_1 – скорость подвижных частей в момент удара.

Конкретные значения энергии единичного удара могут быть получены различным сочетанием m и V_1 .

Однако следует иметь в виду, что эффективность процесса воздействия на обрабатываемую среду в значительной степени зависит от количества движения (импульса тела), равного $S = m \cdot V_1$.

Следовательно, при конструировании гидромолотов максимально возможную энергию единичного удара необходимо получать за счет снижения скорости бойка при соответствующем увеличении массы бойка.

При проектировании гидромолотов необходимо стремиться к повышению ударной мощности и КПД устройства для повышения эффективности разработки грунта.

1.5. Основы расчета гидроударных устройств

Процесс работы гидроударного устройства необходимо рассматривать как функционирование сложной системы, состоящей из конструктивных элементов различных типов.

Поскольку процесс функционирования гидроударной импульсной системы сложен и затруднено ее полное математическое описание в общем виде, поэтому наиболее эффективным и универсальным методом исследования гидроударной импульсной системы является имитационное моделирование.

Общую структуру процесса проектирования гидроударной импульсной системы в САПР можно представить в виде алгоритма (рис. 1.8), в котором чередуются поисковые, расчетные и иные процедуры, выполняемые ЭВМ, и творческие процедуры, связанные с принятием решений о приемлемости полученных результатов или об

изменении направлений поиска, выполняемые проектантом-разработчиком /6/.



Рис.1.8. Алгоритм проектирования гидроударной импульсной системы

Для реализации такой концепции проектирования необходима декомпозиция общей задачи проектирования гидроударной импульсной системы на ряд последовательно решаемых подзадач меньшей размерности.

Алгоритм проектирования делит проектирование на структурное и параметрическое. Под структурным проектированием понимается выбор структуры, конфигурации, облика гидроударной импульсной системы, что в настоящее время наиболее эффективно выполняет человек-проектант, основываясь на своем опыте, традициях и т.д. Это, так называемые, неформализованные задачи проектирования.

К структурным характеристикам гидроударной импульсной системы можно отнести следующие:

- количество полостей гидроударного устройства (взводящей, сливной, пневмоаккумуляторной, управляющей и т.д.);
- расположение полостей гидроударного устройства;
- способ вытеснения рабочей жидкости при рабочем ходе поршня-бойка;
- способ нанесения удара инструмента по обрабатываемому грунту (с непосредственным ударом, через шабот, с опорным кронштейном, комбинированный и т.д.);
- тип блока управления рабочим циклом гидроударного устройства (золотниковый, беззолотниковый, клапанный и т.д.);
- форма и расположение блока управления рабочим циклом гидроударного устройства (внутри корпуса, снаружи и т.д.);
- количество энергоносителей (один – рабочая жидкость, два – газ и рабочая жидкость).

При параметрическом проектировании (формализованных задачах проектирования) гидроударной импульсной системы проектант-разработчик задает параметры, которые необходимо оптимизировать, целевую функцию (критерий), дисциплинирующие условия, метод оптимизации, составляет программы оптимизации (или использует уже существующие), определяет исходные данные.

Исходными данными для выбора и расчета основных параметров гидроударной импульсной системы являются мощность насосной станции $N_{пр}$ (приводная) базовой машины и масса базовой машины m_3 .

Можно выделить следующие характерные компоненты гидроударного устройства (ГУ), сочетание которых однозначно определяет конкретные механизмы. Это – корпусные детали, подвижные детали, рабочие полости (камеры), каналы и гидролинии для подвода рабочей жидкости от ИП.

Кроме того, работа ГУ во многом определяется его взаимодействием с инструментом, по которому передается энергия удара бойка в обрабатываемую среду, и манипулятором, удерживающим ГУ и осуществляющим управление всем процессом.

Подвижными деталями ГУ считаются элементы устройства, совершающие перемещения под действием давления рабочей среды (жидкости, газа). К числу их могут быть отнесены поршень, боек,

клапан, золотник, упругий элемент, корпусные детали устройства и др. Чаще всего перемещения подвижных деталей происходят вдоль одной оси. Следует отметить, что перемещения подвижных деталей ГУ обычно ограничены некоторыми конструктивными размерами.

Рабочие полости (камеры) ГУ рассматриваются как замкнутые объемы, в которых происходит изменение параметров находящейся в них рабочей среды (жидкости или газа для пневмоаккумуляторной полости). Рабочие полости могут быть как постоянного, так и переменного объема.

Гидролинии для подвода рабочей жидкости представляют собой систему каналов, содержащую местные сопротивления и разветвления, и играют важную роль в процессах наполнения и опорожнения рабочих полостей. В связи с этим характеристики гидролиний (геометрические размеры, повороты, разветвления, изменения эффективной площади и т.п.) могут оказать существенное влияние на параметры рабочего цикла ГУ и его энергетические характеристики.

В соответствии с указанным делением ГУ на конструктивные элементы любая модель работы ГУ должна включать в себя информацию о каждом из элементов и предусматривать возможность определения изменений в его состоянии. В противном случае необходимо сделать определенные допущения относительно характера взаимодействия элемента, который не учитывается при расчете, с остальными компонентами системы.

Развитие теории ГУ шло по пути расширения моделей за счет привлечения все большего числа элементов [2, 7, 10, 21]. Первоначально внимание уделялось только механическим характеристикам работы устройства и поэтому рассматривалось движение бойка под действием сил давлений рабочей среды.

В общем виде система уравнений движения i -го подвижного элемента в дифференциальной форме может быть записана следующим образом:

$$m_i \frac{d^2 x_i}{dt^2} = F_{di} - F_{ci}, \quad (1.2)$$

где x_i – перемещение подвижного элемента; m_i – масса подвижного элемента; F_{di} – движущая сила; F_{ci} – сила сопротивления.

Движущая сила зависит от величин давлений, действующих в полостях ГУ, и эффективных площадей полостей. Сила сопротивления учитывает силы механического трения, вязкого трения, силы противодействия, силы гидравлического сопротивления, возникающие при вытеснении жидкости из полостей при работе ГУ.

Если теперь делать допущения относительно характера изменения давлений, не привлекая дополнительных уравнений, можно получать довольно простые модели работы ГУ. Важным результатом такого подхода является получение простых и удобных выражений для конструктивного расчета ГУ.

Появление современных средств вычислительной техники позволило создать модели достаточно сложных механизмов. При этом ставится некоторая задача проектирования ГУ с рациональным сочетанием конструктивных параметров. И критерии оценки работы проектируемого устройства могут быть самыми разными, но решение с точки зрения математической постановки носит характер оптимизации.

Существует достаточно много методов решения этих задач, но общей их особенностью является необходимость многократного вычисления целевой функции. Чаще всего в качестве критериев используются интегральные характеристики работы устройства: энергия удара, частота ударов, ударная мощность, расход жидкости и т.д. Получение этих характеристик в процессе моделирования ГУ на ПЭВМ требует решения систем обыкновенных дифференциальных уравнений для рабочего цикла устройства.

Многообразие моделей гидроимпульсной техники, в частности гидромолотов, позволяет выявить определенные закономерности в проектировании подобных устройств и выработать объективные рекомендации при выборе конструктивных параметров гидроударных устройств.

1.6. Уравнения регрессии основных параметров гидроударных устройств

В настоящее время как отечественная промышленность, так и зарубежные фирмы выпускают большое количество гидроударных

импульсных систем различных типов, моделей и назначения, в особенности гидромолотов.

Отечественная промышленность выпускает гидравлические молоты с энергией удара от 1200 до 9000 Дж, предназначенные для навешивания на гидравлические экскаваторы II...IV размерных групп в качестве сменного рабочего оборудования активного действия (см. разд. 1).

За рубежом ряд фирм ведущих промышленных стран – Финляндии, Германии, Японии, Франции, США – серийно выпускают гидравлические молоты различных типоразмеров.

Многообразие моделей существующих гидроударных импульсных систем (гидромолотов) вместе с накопленным опытом их применения позволяет выявить определенные закономерности и новые тенденции в методах и средствах их проектирования и выработать объективные рекомендации для выбора конструктивных параметров гидроударных устройств, являющихся основой гидроударных импульсных систем.

При этом следует иметь в виду, что сообщения некоторых зарубежных фирм носят рекламный характер, а параметры гидромолотов при этом далеки от оптимальных. В связи с этим основные параметры всех моделей гидромолотов целесообразно рассматривать как случайные величины, следует обработать их методами математической статистики и сделать регрессионный анализ с целью установления вида зависимости между параметрами.

Это позволит прогнозировать дальнейшие изменения параметров гидроударного устройства и выбрать их оптимальными при проектировании новых конструкций гидроимпульсной техники.

Анализ статистических данных по гидромолотам фирм “Krupp” (Германия), NPK (Япония), “Rammer”, “Roxson” (Финляндия) /7, 8/ позволил выявить тесную связь между следующими его основными параметрами /7/:

- диаметром хвостовика инструмента гидромолота и энергией единичного удара гидромолота;
- массой гидромолота и энергией единичного удара гидромолота;
- массой гидромолота и массой экскаватора (базовой машины);

Выбор вида функций, определение коэффициентов уравнений регрессии, значений абсолютных погрешностей производились на ПЭВМ с использованием существующих инструментальных математических средств, таких как система EUREKA /11/.

Уравнение регрессии для зависимости диаметра хвостовика инструмента от энергии единичного удара для гидромолотов различных фирм и “обобщенного” гидромолота (строка "Для всех"), значения коэффициентов уравнения регрессии, максимальная относительная ошибка вычислений приведены в табл. 1.1.

Таблица 1.1

Значения коэффициентов уравнения регрессии для зависимости диаметра хвостовика инструмента d (мм) от энергии единичного удара T (Дж)
[уравнение типа $d(T)=a_0+a_1\cdot T+a_2\cdot T^2$]

Гидромолоты	Коэффициенты			Максимальная ошибка, %
	a_0	a_1	a_2	
Для всех	49,17	0,0354	$-2,8885\cdot 10^{-6}$	6...10
Krupp	48,80	0,0303	$-1,7779\cdot 10^{-6}$	10
NPK	44,90	0,0344	$-2,6359\cdot 10^{-6}$	8
Rammer	99,85	0,0092	0	6
Roxson	49,30	0,0429	$-4,2820\cdot 10^{-6}$	6

Уравнение регрессии для зависимости массы гидромолота от энергии единичного удара для гидромолотов различных фирм и “обобщенного” гидромолота, значения коэффициентов уравнения регрессии, максимальная относительная ошибка вычислений приведены в табл. 1.2.

Таблица 1.2

Значения коэффициентов уравнения регрессии для зависимости массы гидромолота M (кг) от энергии единичного удара T (Дж)
[уравнение типа $M(T)=a_0+a_1\cdot T+a_2\cdot T^2$]

Гидромолоты	Коэффициенты			Максимальная ошибка, %
	a_0	a_1	a_2	
Для всех	3,20	0,5704	-0,000035	15...26
Krupp	63,64	0,4414	0	10...26
NPK	11,50	0,5211	0	7...23
Rammer	-212,76	0,5335	-0,000014	5
Roxson	91,24	0,4301	-0,000024	11

В табл. 1.3 приведен тип уравнения регрессии, значения коэффициентов уравнения регрессии для зависимости массы гидромолота

от массы экскаватора для гидромолотов различных фирм и “обобщенного” гидромолота.

Таблица 1.3

Значения коэффициентов уравнения регрессии для зависимости массы гидромолота M (кг) от массы экскаватора m_3 (т)
[уравнение типа $M(m_3)=a_0+a_1 \cdot m_3 +a_2 \cdot m_3^2$]

Гидромолоты	Коэффициенты			Максимальная ошибка, %
	a_0	a_1	a_2	
Для всех	157,36	27,90	1,028	24...32
Grupp	76,74	31,79	0,993	23
НРК	-65,16	58,68	0	16
Rammer	-98,36	57,10	0	8
Roxson	-99,24	67,47	0	26

На рис. 1.9 представлены графические зависимости диаметра хвостовика инструмента от энергии единичного удара гидромолота, построенные по данным табл. 1.1. Анализ графических зависимостей показывает, что минимально возможный диаметр хвостовика инструмента составляет около 60 мм для энергии удара 200 Дж, затем, с увеличением энергии единичного удара, происходит увеличение диаметра хвостовика инструмента и при энергии единичного удара 5000...6000 Дж составляет около 150...160 мм.

На рис. 1.10 представлены графические зависимости массы гидромолота от энергии единичного удара, построенные по данным табл. 1.2. Минимальная масса гидромолотов с энергией удара 200 Дж находится в пределах от 120 до 180 кг. С увеличением энергии единичного удара до 6000 Дж масса гидромолота в зависимости от фирмы-изготовителя возрастает и находится в пределах от 1800 до 3200 кг.

На рис. 1.11 представлены графические зависимости массы гидромолота от массы экскаватора, построенные по данным табл. 1.3. Масса гидромолотов, устанавливаемых на экскаваторы массой 4 т, находится в пределах от 130 до 220 кг, при увеличении массы экскаватора до 40 т масса гидромолота увеличивается до 2200...3000 кг.

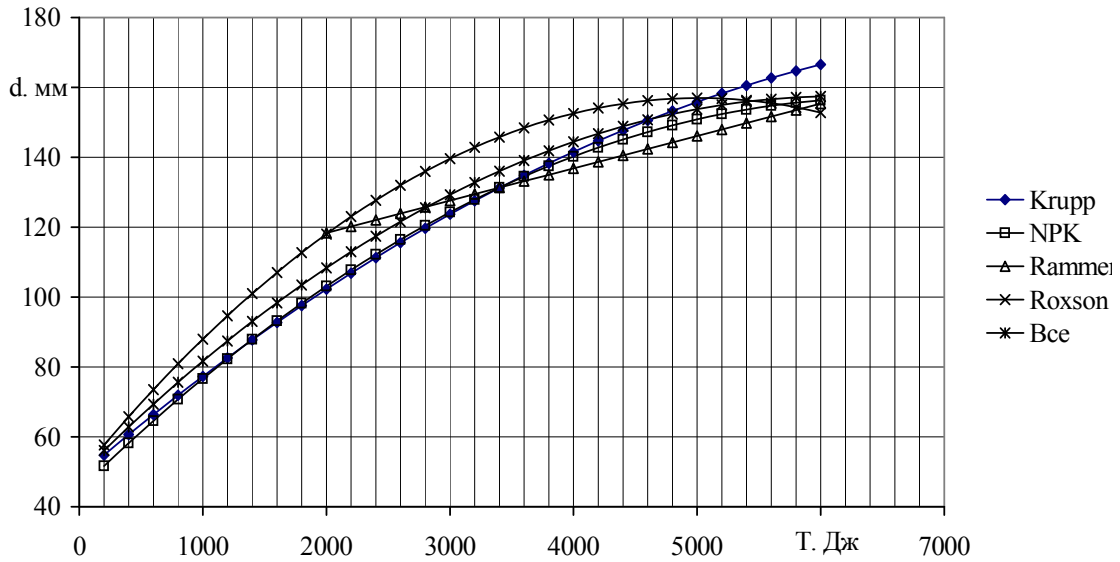


Рис. 1.9. Зависимость диаметра хвостовика инструмента от энергии единичного удара

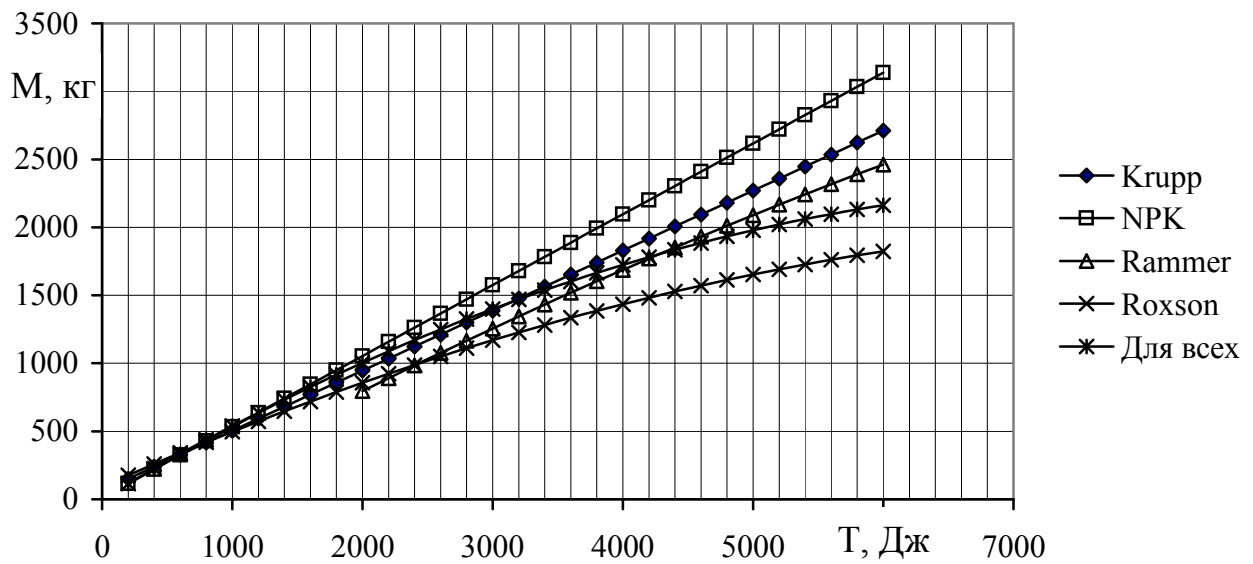


Рис. 1.10. Зависимость массы гидромолота от энергии единичного удара

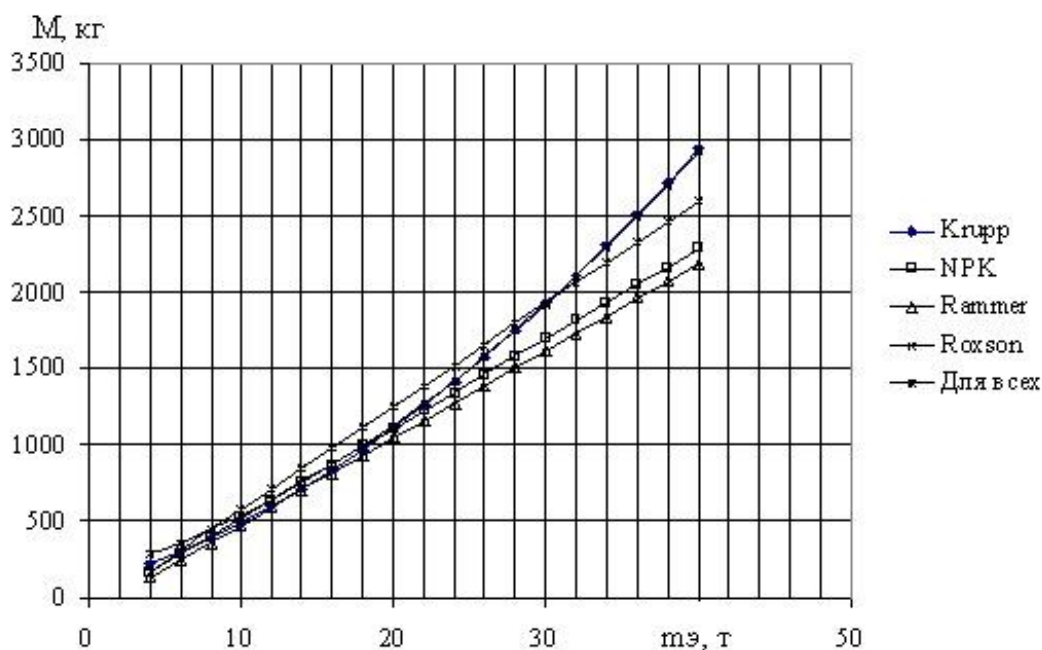


Рис. 1.11. Зависимость массы гидромолота от массы экскаватора

Анализ статистических данных по гидромолотам зарубежных фирм позволил выявить тесную связь и получить уравнения регрессии между следующими его основными параметрами:

- диаметром хвостовика инструмента гидромолота и энергией единичного удара гидромолота T :

$$d(T)=a_0+a_1 \cdot T+a_2 \cdot T^2, \quad (1.3)$$

где a_0, a_1, a_2 – коэффициенты, $a_0 = 49,17$; $a_1 = 0,0354$;
 $a_2 = -2,8885 \cdot 10^{-6}$; T – энергия единичного удара, Дж, $T \in (200, 6000)$;

- массой гидромолота и энергией единичного удара гидромолота T :

$$M(T)=a_0+a_1 \cdot T+a_2 \cdot T^2, \quad (1.4)$$

где a_0, a_1, a_2 – коэффициенты, $a_0 = 3,20$; $a_1 = 0,5704$;
 $a_2 = -0,000035$; T – энергия единичного удара, Дж, $T \in (200, 6000)$;

- массой гидромолота и массой экскаватора (базовой машины):

$$M(m_э)=a_0+a_1 \cdot m_э+a_2 \cdot m_э^2, \quad (1.5)$$

где a_0, a_1, a_2 – коэффициенты, $a_0 = 157,36$; $a_1 = 27,90$; $a_2 = 1,028$;
 $m_э$ – масса экскаватора, т, $m_э \in (4, 40)$.

Найденные зависимости основных параметров гидромолотов являются не только аппаратом для проектирования и прогнозирования, но и средством систематизации, обобщения существующей информации.

2. РАБОЧИЕ ОРГАНЫ УДАРНОГО ДЕЙСТВИЯ ДЛЯ УПЛОТНЕНИЯ ГРУНТА ТРАМБОВАНИЕМ

2.1. Особенности уплотнения грунта трамбованием

Эффективная работа грунтоуплотняющих машин возможна лишь в том случае, если при их создании учтены физико-механические свойства грунтов /24/.

При изучении грунтов исследователь неизбежно сталкивается с чрезвычайным разнообразием их свойств. Нас грунт интересует как среда объекта воздействия грунтоуплотняющей машины с целью изменения его физико-механических свойств.

В грунтах принято различать три фазы: твердую, жидкую и газообразную. От свойств этих компонентов, их количества, характера взаимодействия зависят физико-механические свойства грунтов. Соотношение в грунте частиц различного размера характеризуется его зерновым составом, который положен в основу классификации грунтов. Крупность минеральных частиц в грунтах обычно менее 2 мм.

По дорожной классификации частицы размерами меньше 0,005 мм принято называть глинистыми, от 0,005 до 0,05 мм – пылеватыми и от 0,05 до 2 мм – песчаными. Грунты условно разделяют на связные, несвязные и малосвязные /24/. К связным относятся грунты, содержащие более 12 % глинистых частиц, а к несвязным – грунты, где их содержание не превосходит 3 %. Грунты, где количество глинистых частиц находится в пределах 4...11 %, относятся к малосвязным /24/.

Для определения физических характеристик свойств грунтов (плотность скелета грунта, коэффициент пористости, пористость и др.) необходимо знать три основных показателя: плотность грунта ρ , плотность твердых частиц грунта γ_s , природную влажность грунта W /25/.

Плотность скелета грунта является основным показателем, по значению которого оценивается качество возведения различных сооружений из грунта. Он служит косвенным показателем прочностных и деформационных характеристик грунта и показывает компактность строения вне зависимости от содержания в нем воды.

Количественную характеристику объема, занимаемого в грунте порами, определяют два показателя: пористость Π и коэффициент пористости e . Численные значения пористости используют при определении сжимаемости грунтов, степени уплотняемости, просадочности и в других случаях. Значение коэффициента пористости непосредственно используется при оценке плотности сложения грунтов.

Консистенция глинистых грунтов характеризует их способность сопротивляться пластическому изменению формы /25/. Показателями пластических свойств глинистых грунтов являются влажность на границе текучести W_L , влажность на границе раскатывания W_P и число пластичности I_p :

$$I_p = W_L - W_P. \quad (2.1)$$

Эти значения влажности грунта (W_L , W_P) известны в литературе как пределы Аттерберга и применяются при классификации глинистых грунтов (табл. 2.1).

Таблица 2.1

Классификация глинистых грунтов

Виды глинистых грунтов	Число пластичности
Супесь	$1 \leq I_p \leq 7$
Суглинок	$7 < I_p \leq 17$
Глина	$I_p > 17$

Количественное разграничение состояний глинистых грунтов производится с помощью показателя консистенции I_L , определяемого по формуле

$$I_L = \frac{W - W_P}{W_L - W_P}. \quad (2.2)$$

При $I_L < 0$ грунт находится в твердом состоянии, при $I_L > 1$ – в текучем состоянии и при $0 \leq I_L \leq 1$ грунт обладает пластичностью.

От показателей консистенции глинистого грунта в значительной степени зависит его прочность и сжимаемость.

Основные характеристики физических свойств грунтов и соотношения между ними приведены в табл. 2.2 /25/.

Основные характеристики физических свойств грунтов

Показатели, определяемые опытом	Показатели, вычисляемые по формулам
<p>ρ – плотность грунта, г/см³;</p> <p>W – природная влажность грунта, измеряется в долях единицы;</p> <p>γ_S – плотность твердых частиц грунта, г/см³</p>	1. Плотность скелета грунта
	$\delta = \frac{\rho}{1 + W}. \quad (2.3)$
	2. Пористость грунта
	$n = 1 - \frac{\delta}{\gamma_S}. \quad (2.4)$
	3. Коэффициент пористости грунта
	$e = \frac{n}{1 - n} = \frac{\gamma_S - \delta}{\delta} = (1 + W) \frac{\gamma_S}{\gamma} - 1. \quad (2.5)$
	4. Объем пор грунта в единице его объема
	$n = \frac{e}{1 + e}. \quad (2.6)$
5. Объем твердых частиц в единице объема грунта	
$m = \frac{1}{1 + e}. \quad (2.7)$	
6. Полная влагоемкость грунта	
$W_{\max} = \frac{e \cdot \gamma_W}{\gamma_S}, \quad (2.8)$	
где γ_W – плотность воды, $\gamma_W = 1 \text{ г/см}^3$	
7. Степень влажности грунта	
$G = \frac{W}{W_{\max}} = \frac{W \cdot \gamma_S}{e \cdot \gamma_W}. \quad (2.9)$	
8. Коэффициент пористости при полном заполнении пор грунта водой	
$e = W_{\max} \cdot \gamma_S. \quad (2.10)$	

Наиболее представительным грунтом является суглинок, который составляет 40,3 % от общего грунтового фонда, далее следует супесь – 19,8 %, песок – 15,3 %, глина – 12,8 % /7/.

Существование в природных условиях одного и того же грунта различной пористости и плотности указывает на то, что грунты могут быть сжаты. Сжимаемость грунтов под действием уплотняющих нагрузок может быть объяснена следующими основными физическими причинами /24, 25/ :

а) переукладкой скелета грунта, т.е. перемещением частиц грунта после нарушения положения равновесия;

б) выжиманием жидкости и газа в соседние слои грунта, подвергнутые меньшим давлениям, вплоть до выхода в атмосферу;

в) деформацией зерен скелета грунта как частиц твердого тела, возможно, с разрушением некоторых из них;

г) сжатием наполнителя пор (жидкости и газа) при переукладке грунта;

д) деформацией формы и связанной с этим переукладкой грунта.

Сжимаемость грунтов может быть охарактеризована компрессионными характеристиками, которые устанавливают зависимость между коэффициентом пористости грунта e и давлением p , т.е. $e = f(p)$ /25/. Если заменить компрессионную кривую прямолинейным отрезком, то получается соотношение /25/:

$$e_i = e_0 - m_0 \cdot p_i , \quad (2.11)$$

где e_i – коэффициент пористости грунта при любом напряженном состоянии; e_0 – начальный коэффициент пористого грунта; m_0 – коэффициент сжимаемости (уплотнения); p_i – уплотняющее давление.

Дифференцируя уравнение (2.11), получим

$$de = -m_0 dp . \quad (2.12)$$

Полученное соотношение называется законом уплотнения грунтов /21/.

Между относительной деформацией грунта ε_i и коэффициентом пористости грунта e существует зависимость /25/:

$$\varepsilon_i = \frac{\Delta h_i}{h} = \frac{e_0 - e_i}{1 + e_0} , \quad (2.13)$$

где Δh_i – осадка грунта при данной нагрузке p_i , измеренная от начала нагружения; h – начальная высота образца грунта.

При уплотнении деформация грунта состоит из двух частей: обратимой (упругой) и необратимой (остаточной).

Для грунта зависимость между осевыми сжимающими напряжениями σ и соответствующими деформациями ε может быть представлена в виде закона Гука [24, 25]:

$$\sigma = \varepsilon \cdot E, \quad (2.14)$$

где E – модуль общей деформации грунта.

Целью уплотнения грунтов является получение плотной и прочной структуры грунта, способной без значительных деформаций выдерживать действующие нагрузки и климатические факторы.

Многочисленные исследования показали, что механические характеристики грунтов (модуль общей деформации, сцепление, угол внутреннего трения) зависят от его физических характеристик и главным образом от влажности и плотности скелета грунта.

Нормы плотностей различаются по видам земляных инженерных сооружений. Наиболее обоснованные нормы плотности разработаны для земляного полотна автомобильных и железных дорог.

Критерием оценки качества уплотнения грунтов принята величина максимальной плотности, достигнутой при оптимальной влажности.

Минимальная требуемая плотность грунта δ_0 устанавливается в зависимости от наибольшего значения плотности скелета грунта (δ_{\max}) при оптимальной влажности, полученной в лаборатории методом стандартного уплотнения, по формуле

$$\delta_0 = k \cdot \delta_{\max}, \quad (2.15)$$

где k – коэффициент уплотнения.

Нормами плотности устанавливаются значения коэффициента уплотнения k . Для ответственных земляных сооружений этот коэффициент нормируется в пределах 0,98...1,0. Следует отметить, что плотность, равная $(0,95...0,98)\delta_{\max}$, является расчетной при проектировании всех видов машин для уплотнения грунтов. Достижение более высокой плотности $1,0\delta_{\max}$ возможно путем увеличения числа

проходов машин или методом снижения толщины уплотняемого слоя грунта.

В строительстве применяются следующие основные способы уплотнения грунтов: укатка, трамбование, вибрационный и комбинированный. На рис. 2.1 представлена классификация способов и средств механизированного уплотнения грунта.

Распространенным способом уплотнения грунтов в строительстве является укатка катками. Катки отличаются малой маневренностью и обеспечивают малую глубину уплотнения, особенно на связных грунтах. Это налагает определенные ограничения на область их применения, особенно в стесненных условиях строительного производства, где наиболее перспективными следует считать машины динамического действия, т.е. трамбуемые, вибротрамбующие и вибрационные.

Трамбование – эффективный способ уплотнения грунтов. При трамбовании грунт уплотняется за счет энергии удара рабочего органа. Трамбование – универсальный способ уплотнения грунтов, потому что он пригоден для уплотнения как связных, так и несвязных грунтов на достаточно большую глубину (до 1...1,5м и более), а также возможно его применение в условиях зимнего строительства /24/. Этот способ является также наиболее рациональным при работе в стесненных условиях, так как позволяет производить уплотнение грунта в различных выемках, траншеях, котлованах и т.д. на достаточно большую глубину.

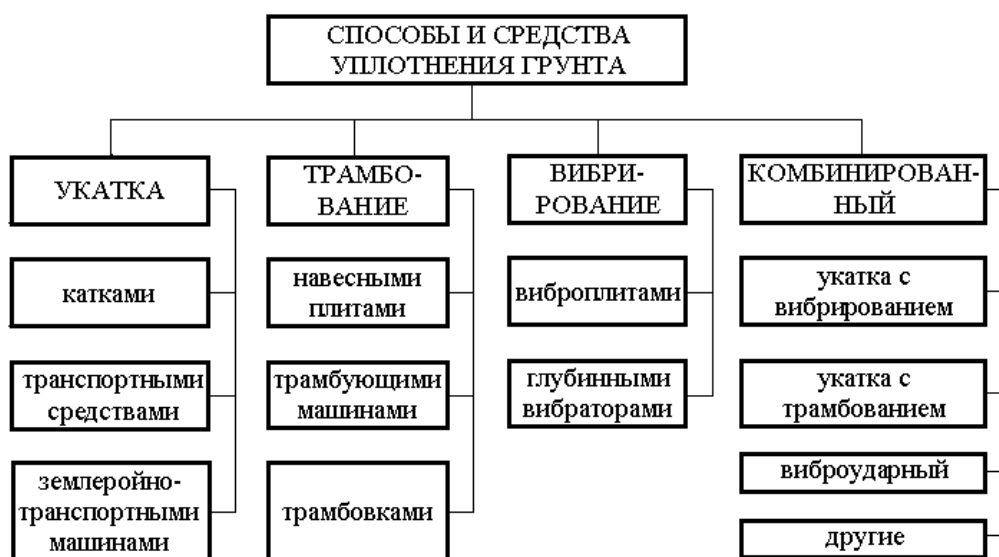


Рис. 2.1. Классификация способов и средств механизированного уплотнения грунтов

При ударе рабочего органа (плиты) о поверхность грунта в нем возникает напряженно-деформированное состояние. Зависимость между напряжением и деформацией грунта под действием ударного рабочего органа показана на рис. 2.2 /24/.

Здесь кривая OAB соответствует повышению напряженного состояния, а кривая BCD отображает процесс снятия нагрузки. Вследствие проявления вязких и инерционных свойств грунта имеет место запаздывание в развитии деформаций от развития напряжений, которое на графике определяется отрезком OA. После запаздывания на участке AB деформация развивается с возрастающей скоростью. В точке B напряжение достигает максимального значения.

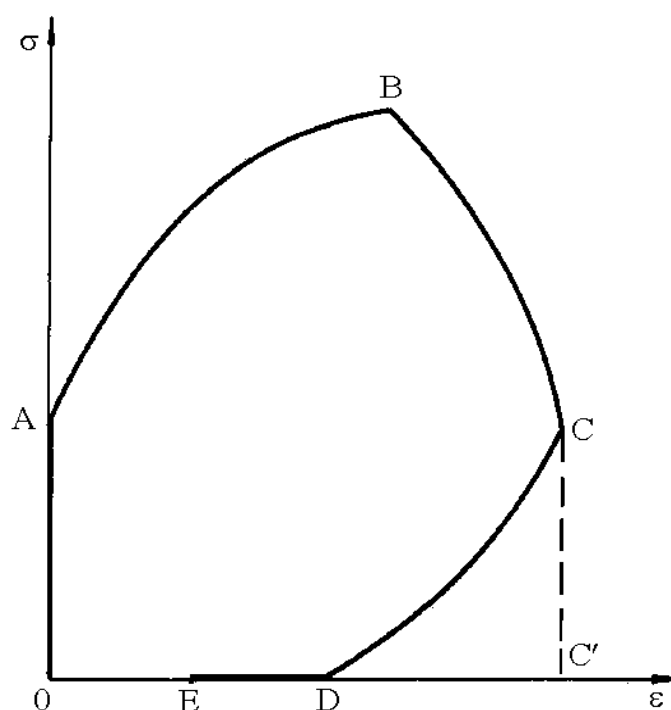


Рис. 2.2. Зависимость между напряжением и деформацией грунта под действием ударного рабочего органа

Развитие же деформаций грунта продолжается, что приводит к достижению максимальной деформации (точка C) уже при пониженном напряжении. Этот процесс называется последствием нагружения /24/. На участке CDE происходит восстановление обратимой части деформации. Отрезок OC' выражает полную деформацию, а отрезки OE и EC' — соответственно необратимую и обратимую ее части.

Вибрационное уплотнение характеризуется совместными колебаниями рабочего органа с уплотняемым грунтом и наиболее эффек-

тивен для уплотнения несвязных грунтов. Процесс уплотнения при вибрировании сводится к тому, что частицы грунта приходят в колебательное движение, связи между частицами нарушаются, уменьшая силы трения и сцепления между ними. Дальнейшая, более плотная укладка частиц грунта совершается в основном под действием силы тяжести.

Комбинированный способ уплотнения объединяет укатку с вибрированием или трамбование с вибрированием.

В процессе уплотнения грунтов укаткой, трамбованием, вибрацией уплотняющие воздействия на них передаются повторно, следуя по определенным циклам, в результате чего на грунт воздействуют циклические нагрузки, характеризующиеся последовательной сменной процессом нагрузки и разгрузки.

К числу параметров циклической нагрузки относятся максимальная величина напряжения, скорость изменения напряженного состояния, частота приложения нагрузки, время воздействия каждого цикла нагрузки, общее время, в течение которого грунт находится в напряженном состоянии.

От параметров циклической нагрузки зависит величина необратимой и обратимой деформации грунта, а следовательно, и эффект уплотнения грунта.

Многочисленные исследования, опыты и практика уплотнения грунтов трамбованием показали, что эффективность уплотнения (качество уплотнения, глубина уплотнения), энергоемкость уплотнения, необходимое число повторностей приложения ударной нагрузки зависят в конечном итоге от основных параметров рабочих органов трамбуемых машин /15, 19, 20, 24/.

Обоснованный выбор основных параметров рабочих органов трамбуемых машин возможен в настоящее время лишь на основе глубокого знания и понимания явлений и процессов, возникающих в уплотняемом грунте при ударе о его поверхность трамбуемого рабочего органа.

Анализ исследований уплотнения грунта трамбованием показал, что наибольшее распространение для расчета параметров трамбуемых рабочих органов получила теория Н.Я.Хархуты.

Теория импульсов Н.Я.Хархуты /24/ основана на использовании уравнения количества движения с оценкой эффективности уплотняющего воздействия трамбуемого рабочего органа на грунт по ве-

личине удельного импульса удара. Явление удара описывается известным выражением:

$$\int_0^{\tau} P dt = m \cdot (V_1 - V_2), \quad (2.16)$$

где τ – время удара; P – сила, развиваемая в процессе удара; m – масса рабочего органа; V_1 – скорость рабочего органа в начале удара; V_2 – скорость рабочего органа в конце удара (принимается равной нулю).

Анализируя уравнение количества движения, Н.Я.Хархута приходит к выводу, что, зная время удара и закономерность изменения силы во времени, можно определить возникающее на поверхности контакта рабочего органа с грунтом контактное напряжение. Зная величину контактного напряжения, можно определить необратимую деформацию грунта и, следовательно, оценить эффект уплотнения.

Н.Я.Хархутой опытным путем установлено абсолютное значение времени удара, найдена зависимость времени удара от вида грунта и его плотности.

Исследованиями Н.Я.Хархуты установлено, что наилучший эффект уплотнения получается, когда величина контактного напряжения рабочего органа с грунтом σ_0 составляет 0,9...1,0 от предела прочности грунта σ_p , т.е. $\sigma_0 = (0,9...1,0)\sigma_p$.

Теория удельных импульсов Н.Я.Хархуты подтверждается результатами многочисленных исследований и практическим опытом /24/.

Под удельным импульсом удара понимается импульс, приходящийся на единицу контактной поверхности. Он может быть найден из выражения

$$i = m \cdot V_1 / S, \quad (2.17)$$

где i – удельный импульс удара, Па·с; S – площадь контактной поверхности трамбующей плиты с грунтом, м²; m – масса подвижных частей, кг; V_1 – скорость в момент удара, м/с.

Рекомендуемые значения предельных удельных импульсов (i_p , МПа·с) для грунтов оптимальной влажности следующие /24/:

- а) грунты малосвязные (супеси) 0,005...0,008;
- б) грунты средней связности (суглинки) 0,008...0,015;

в) грунты высокой степени связности (тяжелые суглинки) 0,015...0,022;

г) грунты весьма связные (глины) 0,022...0,030.

Проф. Н.Я.Хархута получил формулу для определения величины максимального значения контактного напряжения на поверхности грунта σ_0 :

$$\sigma_0 = \alpha \cdot i/\tau, \quad (2.18)$$

где α – определяемый опытным путем безразмерный коэффициент, который учитывает форму импульса и другие факторы; τ – время удара, с.

Коэффициент α определяет остроту импульса и зависит от скорости удара и удельного статического давления рабочего органа q . Под последним понимается отношение силы тяжести подвижных частей к площади контактной поверхности. Значения коэффициента α приведены в табл. 2.3 /24/.

Таблица 2.3

Значения коэффициента α (по Н.Я.Хархуте)

Скорость удара V_1 , м/с	Удельное статическое давление q , МПа			
	0,005	0,015	0,020	0,045
1	1,5	1,3	1,2	1,1
2	1,8	1,5	1,3	1,2
3	2,0	1,7	1,4	1,2
5	2,5	2,0	1,7	1,4
10	3,0	2,5	2,0	1,7

Время удара находится по табл. 2.4 в зависимости от удельного импульса и относительной плотности грунта /24/.

Таблица 2.4

Время удара τ , с

Удельный импульс удара i , МПа·с	Относительная плотность грунта (коэффициент уплотнения) $\bar{\delta} = \delta/\delta_{\max}$			
	0,85	0,90	0,95	1,0
0,005	0,030	0,020	0,015	0,010
0,010	0,050	0,030	0,020	0,015
0,015	0,065	0,040	0,025	0,015
0,020	0,080	0,050	0,030	0,015
0,025	0,095	0,060	0,035	0,020

Минимальные значения контактных напряжений приведены в табл. 2.5 /24/.

Таблица 2.5

Минимальные значения контактных напряжений

Требуемая плотность грунта в долях от δ_{\max} (коэффициент уплотнения $k = \bar{\delta} = \delta/\delta_{\max}$)	0,90	0,95	0,98	1,0
Минимальное значение контактного напряжения в долях от σ_p	0,2...0,3	0,3...0,4	0,6...0,7	0,8...0,9

Таким образом, при проектировании грунтоуплотняющей машины контактные напряжения выбираются в интервале от предела прочности грунта до значений, приведенных в табл. 2.5. При этом следует иметь в виду, что меньшее контактное напряжение требует увеличения времени приложения нагрузки (циклов нагружения).

Многочисленные опыты позволили установить численные значения пределов прочности грунта при оптимальной влажности и плотности $\delta=0,95\delta_{\max}$, которые приведены в табл. 2.6 /24/.

Таблица 2.6

Пределы прочности грунтов

Грунты	Предел прочности грунта, σ_p , МПа
Малосвязные (песчаные, супесчаные)	0,3...0,7
Средней связности (суглинистые)	0,7...1,2
Высокой связности (тяжелосуглинистые)	1,2...2,0
Весьма связные (глинистые)	2,0...2,3

В грунтоуплотняющих машинах с шаботом максимальное значение контактного напряжения определяется по формуле /24/:

$$\sigma_0 = k_{\text{ш}} \frac{\alpha \cdot i}{\tau}, \quad (2.19)$$

где $k_{\text{ш}}$ – общий поправочный коэффициент, учитывающий влияние шабота (массы и жесткости), $k_{\text{ш}} < 1,0$.

Значения коэффициентов k_{III} приведены в работе /24/.

Толщину уплотняемого слоя грунта следует выбирать равной глубине активной зоны, где в процессе уплотнения деформация грунта по глубине распределяется равномерно. В активной зоне реализуется 80...90 % всей необратимой деформации грунта.

Для данного вида грунта глубина активной зоны зависит от геометрических размеров трамбующей плиты (главный фактор), контактного напряжения, скорости изменения напряженного состояния, влажности грунта.

Н.Я.Хархута дает формулу для определения глубины активной зоны h_0 /24/:

$$h_0 = \alpha \cdot B_{\min} \frac{W}{W_0} \left(1 - e^{-3,7 \frac{\sigma_0}{\sigma}} \right), \quad (2.20)$$

где α – коэффициент, зависящий от скорости изменения напряженного состояния, $\alpha = 1,1$ – для связных грунтов, $\alpha = 1,3$ – для несвязных грунтов; W – влажность уплотняемого грунта; W_0 – оптимальная влажность уплотняемого грунта; e – число Эйлера; B_{\min} – минимальный поперечный размер поверхности контакта трамбующей плиты с уплотняемым грунтом, м.

Зависимость глубины активной зоны от минимального поперечного размера трамбующей плиты B_{\min} и отношения σ_0/σ представлена на рис. 2.3.

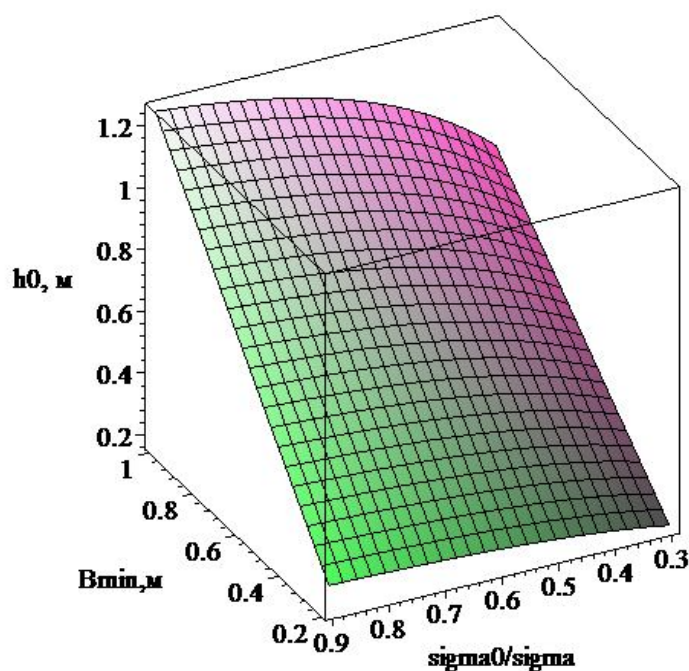


Рис. 2.3. Зависимость глубины активной зоны h_0 от размера трамбующей плиты V_{\min} и отношения σ_0/σ

Исследованиями /24/ установлено, что для достижения требуемой плотности грунта на заданной глубине должно действовать сжимающее напряжение σ_z , величина которого определяется по формуле

$$\sigma_z \geq \gamma \cdot \sigma_p . \quad (2.21)$$

Коэффициент γ зависит от требуемой плотности грунта, значения его приведены в табл. 2.7 /24/.

Таблица 2.7

Значения коэффициента γ

Требуемая плотность в долях от δ_{\max}	0,90	0,95	0,98	1,0
Коэффициент γ	0,08...0,10	0,10...0,15	0,25...0,30	0,40...0,45

Таким образом, по результатам многочисленных исследований и практического опыта установлено, что для обеспечения качественного уплотнения грунта трамбованием на заданную глубину до требуемой плотности необходимо соблюдать следующие основные условия:

- Удельный импульс удара должен составлять 0,9...1,0 предельного импульса для данного вида грунта.

- Возникающее на поверхности контакта максимальное напряжение должно составлять $0,9 \dots 1,0$ предела прочности грунта.
- Напряжения на заданной глубине должны обеспечивать требуемую плотность грунта.
- Влажность грунта должна быть близка к оптимальной.

2.2. Анализ конструкций машин для уплотнения грунта трамбованием

Основная масса (около 70 %) всех грунтов в строительстве – связные грунты, что значительно повышает требования к средствам уплотнения грунтов, в том числе и в стесненных условиях строительного производства.

ЦНИИОМТП Госстроя разработал типовые схемы стесненных мест в строительстве, представленные на рис. 2.3. Из этих схем видно, что в строительстве возникает необходимость в уплотнении грунтов при обратной засыпке траншей, пазух фундаментов вокруг смотровых колодцев, различного вида опор, при устройстве грунтовых подсыпок под полы и пр.

Работа грунтоуплотняющего оборудования в стесненных условиях характеризуется следующими особенностями:

а) ограничены возможности движения базовой машины, что обуславливает в основном ее позиционную работу, и уплотнение грунта должно производиться главным образом за счет перестановки рабочего органа;

б) место стоянки базовой машины может отличаться по высоте от уплотняемой поверхности грунта;

в) необходимость уплотнения грунтов на откосах, где рабочее оборудование работает на крутых наклонных плоскостях, при этом движение базовой машины по этим плоскостям, как правило, является невозможным;

г) работа уплотняющего оборудования в непосредственной близости от инженерных сооружений ограничивает его габаритные размеры;

д) рабочий орган не должен оказывать вредного воздействия на уложенные коммуникации и близко расположенные части сооружения.

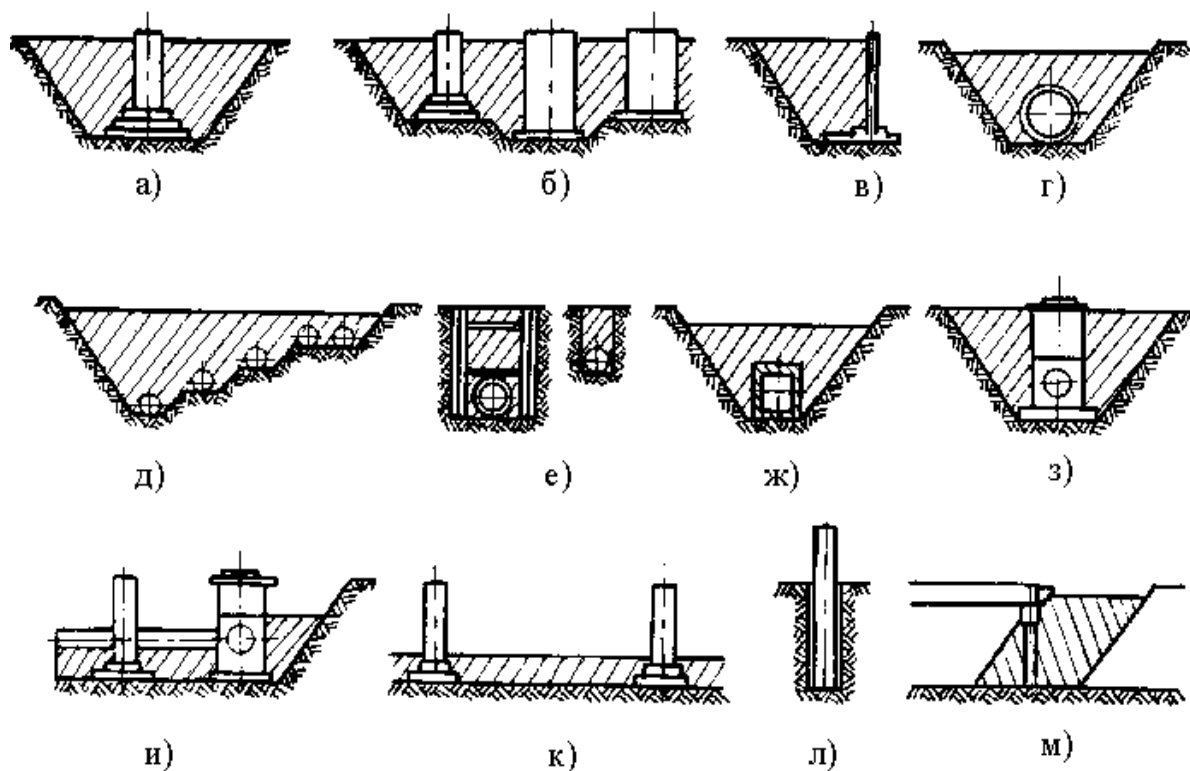


Рис. 2.4. Типовые схемы стесненных мест в строительстве:

а – пазухи между стенками котлованов и фундаментами под колонны; б – пазухи между стенками фундаментов под технологическое оборудование; в – пазухи между стенками котлованов и подпорными стенками; г – пазухи между стенками траншей и трубопроводами; д – пазухи между трубами и стенками траншей при бесколлекторной прокладке; е – пазухи между стенками узких траншей (с креплениями и без них) под трубопроводы; ж – пазухи между стенками траншей и коллекторами; з – пазухи между стенками траншей и смонтированными колодцами; и – пазухи под трубопроводы; к – засыпка грунта внутри зданий под полы; л – пазухи между стенками скважин и опорами линий передач; м – пазухи между земляным полотном и опорами мостов

Анализ отечественной и зарубежной научно-технической литературы, патентных материалов показывает, что в настоящее время для уплотнения грунта в стесненных условиях нашли в основном применение два способа уплотнения – трамбование и вибротрамбование. Наибольшее же применение получает сменное уплотняющее оборудование к базовым машинам – гидравлическим экскаваторам, малогабаритным тракторам, кранам /7, 10, 20 – 23, 27/.

Уплотнение грунтов в стесненных условиях трамбованием осуществляется ручным механизированным инструментом (трамбовками), трамбуемыми машинами и механизмами. Трамбовки по виду

привода можно разделить на электрические, с двигателем внутреннего сгорания и пневматические. Отечественной промышленностью серийно выпускаются трамбовки с электроприводом, а за рубежом в основном – с двигателем внутреннего сгорания.

Электротрамбовки ИЭ-4505 (рис. 2.5) и ИЭ-4502, несмотря на свою сравнительную простоту, не находят широкого применения в строительстве.

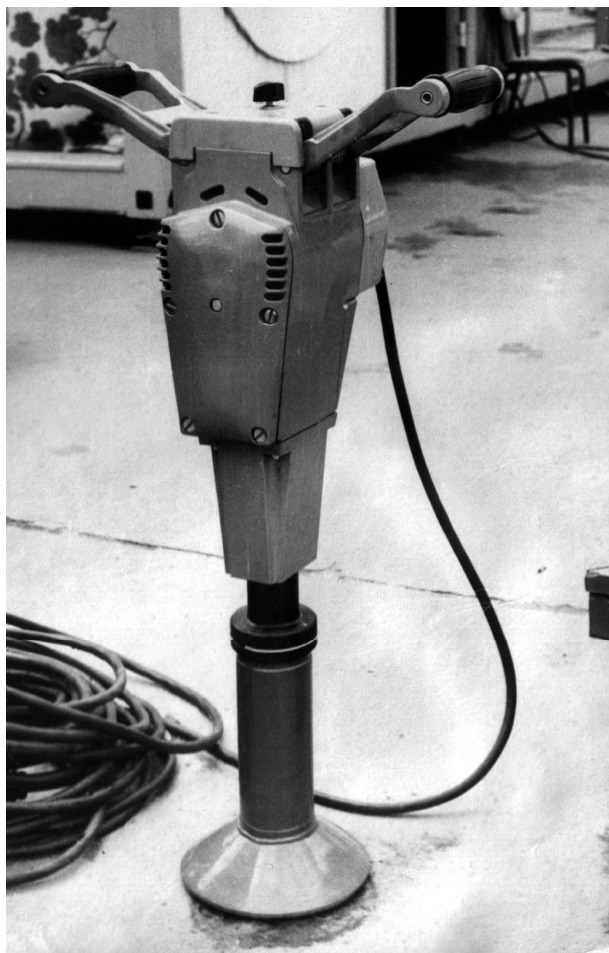


Рис. 2.5. Электротрамбовка ИЭ-4505

Практика показала малую эффективность использования ручных электротрамбовок. Они уплотняют только несвязные грунты, малопродуктивны, обеспечивают незначительную глубину уплотнения, низкое качество уплотнения грунтов (коэффициент уплотнения 0,87).

Срок службы таких машин мал за счет ударных нагрузок на вал электрических машин, в результате чего быстро выходят из строя

подшипники. Электротрамбовки зависят от источника питания электроэнергией, а следовательно, не мобильны.

Трамбующая машина Д-471В (ДУ-12В) (рис. 2.6) на базе трактора Т-130 предназначена для послойного уплотнения связных и несвязных грунтов на глубину до 1,0...1,2м при отсыпке земляного полотна железных и автомобильных дорог, дамб, плотин и других земляных сооружений.

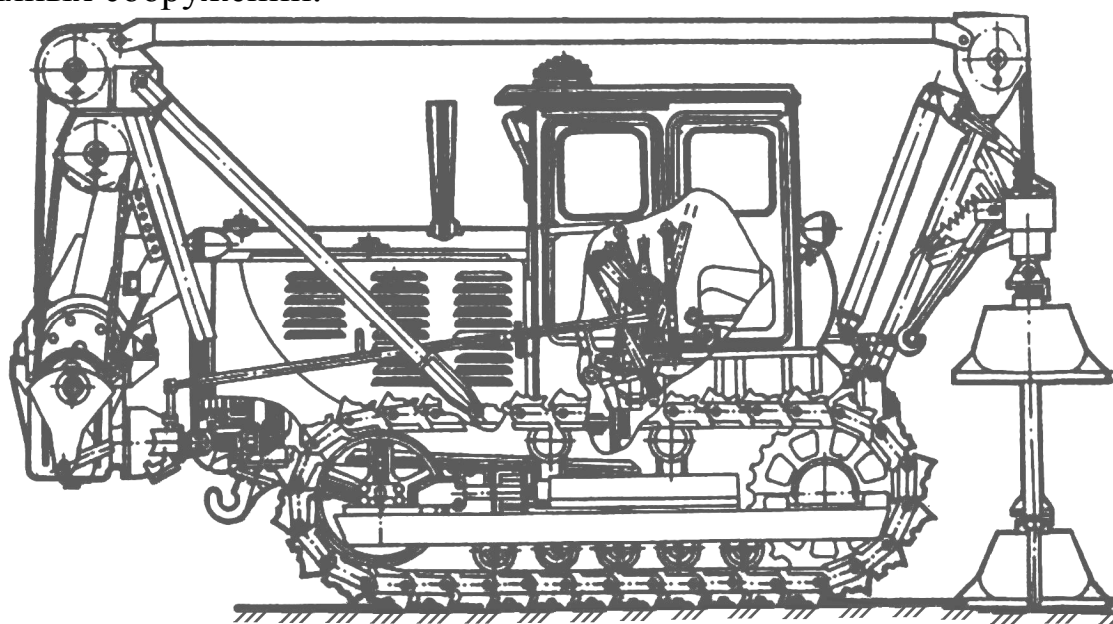


Рис. 2.6. Трамбующая машина Д-471В (ДУ-12В)

Рабочими органами машины являются две плиты массой 1300 кг, поочередно поднимаемые на высоту 1,2м и свободно сбрасываемые кривошипно-полиспастным механизмом. Трамбующую машину Д-471В рекомендуется применять при больших объемах и широком фронте работ /15/.

Трамбующие машины со свободно падающими плитами отличаются высокой металлоемкостью, большими габаритами, низкой маневренностью, а также тем, что рабочий орган в этих машинах не обеспечивает возможность уплотнения грунтов в значительном удалении от базовой машины. Поэтому эти машины находят ограниченное применение при уплотнении грунтов в стесненных условиях.

В последнее время распространение получают трамбующие машины с рабочим органом двойного действия, разделяющиеся по виду привода на дизельные, электрические, электромагнитные, гидравлические, пневматические, механические, взрывного действия и комбинированные.

Из малогабаритных машин, используемых для работы в стесненных условиях, применяются мототрамбовки, уплотняющие плиты (рис.2.7), электротрамбовки (рис. 2.8), взрывные трамбовки.

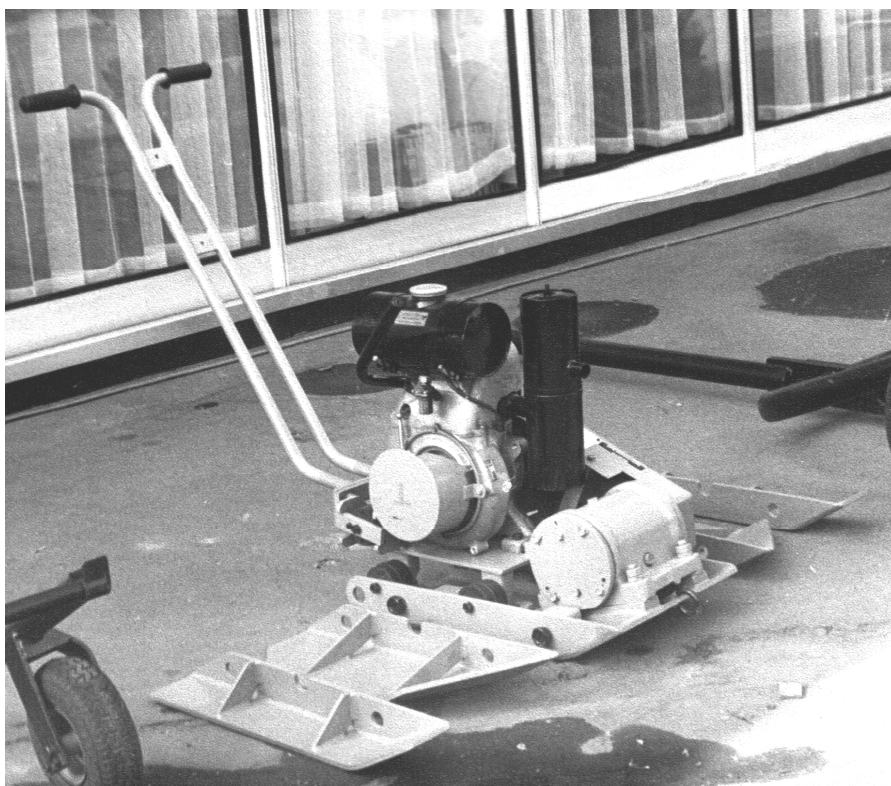


Рис. 2.7. Уплотняющая плита

Общим недостатком указанных машин является их высокая чувствительность к уклону местности, возможность уплотнения только несвязных грунтов, незначительная глубина уплотнения, а также необходимость присутствия оператора непосредственно рядом с машиной, что небезопасно.

Широкое распространение в последние годы гидравлических экскаваторов способствовало появлению различного вида сменного навесного оборудования к этим машинам, в том числе и для уплотнения грунта /28 – 36/.

Наличие управляемой стрелы и рукояти позволяет выносить грунтоуплотняющее оборудование на значительное расстояние от экскаватора, опускать, поднимать, поворачивать, устанавливать его в заданное положение и удерживать в таком состоянии.

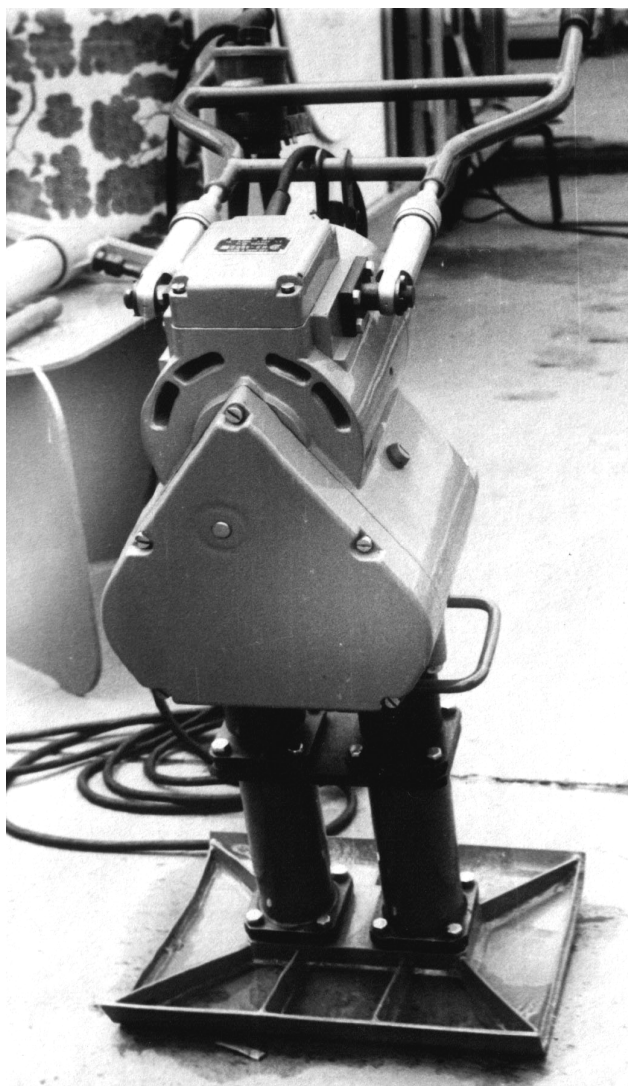


Рис. 2.8. Электротрамбовка

За рубежом основными производителями грунтоуплотняющего оборудования (рис. 2.9 – 2.12) являются фирмы Германии, США, Англии, Франции, Японии, Швеции и др. /28 – 36/.

Несмотря на большое разнообразие конструктивных решений, навесное грунтоуплотняющее оборудование к гидравлическим экскаваторам, выпускаемое за рубежом, состоит в основном из вибровозбудителя с дебалансными валами, приводимого в движение гидромотором, уплотняющей плиты и подвески к экскаватору. Общими недостатками такого оборудования является то, что оно способно уплотнять только несвязные и малосвязные грунты, а наличие вращающихся деталей, ременных передач приводит к снижению долговечности, надежности подшипниковых узлов и всего оборудования в целом.



Рис. 2.9. Трамбующая машина



Рис. 2.10. Трамбовочные пластины SBV 360 4WD STEHR



Рис. 2.11. Бензиновые вибротрамбовки



Рис. 2.12. Трамбующее навесное оборудование

Наиболее перспективными навесными грунтоуплотняющими машинами к экскаваторам являются гидротрамбовки на основе гидравлических ударных устройств. Важным преимуществом гидродарного оборудования является их универсальность, широкая область их применения для выполнения различных видов работ.

3. ОБОСНОВАНИЕ ПАРАМЕТРОВ РАБОЧЕГО ОРГАНА УДАРНОГО ДЕЙСТВИЯ ПРИ УПЛОТНЕНИИ ГРУНТА

3.1. Теоретическое определение основных закономерностей ударного уплотнения грунтов

В процессе удара трамбующей плиты о грунт кинетическая энергия движущихся масс расходуется на совершение упругих и пластических деформаций и преобразуется в другие виды энергии.

Профессором В.Н.Тарасовым было предложено применять общие теоремы динамики к процессу ударного уплотнения грунтов /19, 20/.

В связи с тем, что грунты в разных условиях могут проявлять упругие или упругопластические свойства, сначала рассмотрим общие закономерности поведения грунтов как упругих тел при воздействии на них внешних нагрузок, а затем распространим эти закономерности на грунты как упругопластические тела.

В механике грунтов имеется общепринятая формула, позволяющая определять величину деформации грунта как упругого полупространства под подошвой прямоугольного штампа, нагруженного внешней силой /25/:

$$\lambda_z = \frac{P\omega B(1 - \mu^2)}{ES}, \quad (3.1)$$

где λ_z – вертикальная деформация упругого полупространства под плоским штампом; P – вертикальная нагрузка на штампе; S – площадь контактной поверхности штампа; B – ширина прямоугольной площадки штампа; E – модуль общей (продольной) деформации упругого полупространства; μ – модуль боковой деформации упругого полупространства; ω – коэффициент формы площади и жесткости штампа, определяемый по табл. 3.1 из работы /25/.

Таблица 3.1

Значения коэффициентов ω в функции отношения длины к ширине
 $\alpha = l/B$ для жестких штампов

α	1	2
ω	0,88...0,95	1,22...1,30
Для круглого штампа $\omega = 0,79$		

Формулу (3.1) можно записать в форме закона Гука

$$\lambda_Z = P / C_\Gamma, \quad (3.2)$$

где C_Γ – коэффициент жесткости грунтового полупространства,

$$C_\Gamma = \frac{ES}{\omega B(1 - \mu^2)}. \quad (3.3)$$

По аналогии с деформацией тела, имеющего конечные размеры, для бесконечного однородного упругого полупространства можно записать формулу относительной деформации

$$\varepsilon = \lambda_Z / h_\Gamma, \quad (3.4)$$

где ε – относительная деформация бесконечного упругого полупространства; h_Γ – толщина деформируемого слоя упругого полупространства.

Определим толщину деформируемого слоя h_Γ . Запишем формулу средних контактных напряжений под жестким штампом

$$\sigma = \frac{P}{S} = \varepsilon E. \quad (3.5)$$

Используя уравнения (3.4) и (3.5), запишем формулу вертикальной нагрузки на штампе

$$P = \frac{\lambda_Z}{h_\Gamma} ES. \quad (3.6)$$

Решая совместно уравнения (3.6) и (3.1), получим

$$h_\Gamma = \omega B(1 - \mu^2). \quad (3.7)$$

Таким образом, физическим параметром грунта, влияющим на величину h_Γ деформированного слоя бесконечного однородного упругого полупространства согласно формуле (3.7), является коэффициент Пуассона μ боковой деформации (табл. 3.2).

То есть процесс нагружения упругого полупространства штампом сопровождается появлением боковых деформаций, которые локализуют упругодеформированное полупространство определенными размерами.

Таблица 3.2

Значения коэффициента Пуассона μ для разных типов грунтов /14/

Глины и суглинки	Супеси	Пески
0,10...0,50	0,15...0,40	0,20...0,35

Значения модулей общей деформации E грунтов приведены в табл. 3.3 /24/.

Таблица 3.3

Модули общей деформации грунтов

Состояние грунта	Относительная плотность δ/δ_{\max}	Модуль общей деформации E , МПа
Рыхлый	0,75...0,85	1,0...5,0
Малой плотности	0,85...0,90	5,0...10,0
Почти плотный	0,90...0,95	10,0...15,0
Плотный	0,95...1,0	15,0...20,0

Формулы (3.1)...(3.7), полученные для упругодеформированного полупространства, качественно сохраняются и в случае применения их к грунтам как упругопластическим средам.

Сравним результаты вычисления толщины слоя деформации грунтового полупространства по формуле (3.7) и по формуле (2.20) Н.Я. Хархуты .

Ударное уплотнение грунта оптимально, если $W=W_0$ и $\sigma=\sigma_p$, тогда глубина активной зоны деформации грунта, вычисленная по формуле (2.20), имеет значение

$$h_0 = 1,071B. \quad (3.8)$$

Соответственно по формуле (3.7) толщина деформированного слоя под прямоугольным штампом для $\alpha = 2$ и $\mu = 3$ равна

$$h_T = 1,11B. \quad (3.9)$$

Таким образом, убеждаемся, что формула (3.7), полученная аналитическим путем, и известная эмпирическая формула (2.20) дают практически идентичные результаты.

Рассмотрим процесс ударного уплотнения грунта с позиции теоретической механики как соударение двух тел (трамбуемой плиты с уплотняемым грунтом). При неупругом соударении трамбуемой плиты с уплотняемым грунтом они обмениваются энергией и импульсом /19, 20/.

Процесс ударного уплотнения грунта состоит из двух этапов. Первый этап – ударные взаимодействия масс между собой, в котором отсутствует их относительное перемещение, и второй этап – последующие перемещения масс в толще грунта.

Рассмотрим первый этап рабочего процесса. Пусть m_1 – масса ударной части (трамбующей плиты), которая имеет скорость V_1 в момент соприкосновения с массой m_2 . Величину массы m_2 будем считать равной сумме масс всех элементов, расположенных между трамбующей плитой и уплотняемым грунтом. Вследствие невозможности свободного отскока массы m_1 в гидравлическом механизме считаем удар абсолютно неупругим, для которого коэффициент восстановления $K = 0$. Тогда скорость уплотняющего органа после первого этапа рабочего процесса определяется из выражения

$$m_1 V_1 + m_2 V_2 = (m_1 + m_2) U_1. \quad (3.10)$$

Откуда найдем скорость U_1 :

$$U_1 = V_1 \frac{m_1}{m_1 + m_2}, \quad (3.11)$$

т.к. скорость второго тела перед ударом $V_2 = 0$.

В результате первого этапа рабочего процесса рабочий орган приобретает скорость U_1 и запас кинетической энергии.

Второй этап рабочего процесса – послеударное движение рабочего органа в грунте – опишем, используя теорему об изменении количества движения. Изменение количества движения в начальный и конечный моменты времени обозначим соответственно индексами (1), (2), тогда

$$(m_1 + m_2) U_{(2)} - (m_1 + m_2) U_{(1)} = \sum S(F), \quad (3.12)$$

где $U_{(2)}$ – скорость движущихся масс в конце удара, $U_{(2)} = U_2 = 0$; $U_{(1)} = U_1$.

Импульс внешних сил в правой части уравнения (3.12) создаёт силы тяжести $G = (m_1 + m_2)g$ и силы реакции P со стороны грунта.

Вектор ударного импульса силы реакции грунта имеет отрицательный знак, т.е. направлен противоположно движению рабочего органа. Вектор ударного импульса сил тяжести имеет положительный знак.

Импульс внешних сил в проекции на ось Z , совпадающей с направлением скорости движения, вычисляется интегрированием:

$$\begin{aligned} \sum S(F) &= \int_0^{\tau} (G - P) dt = \int_0^{\tau} G dt - \int_0^{\tau} P dt = \\ &= (m_1 + m_2) g \int_0^{\tau} dt - \int_0^{\tau} P dt. \end{aligned} \quad (3.13)$$

Силу реакции P со стороны грунта будем рассматривать как линейную функцию деформации грунта, вычисляя среднее контактное напряжение по формуле

$$\sigma = K_1 Z, \quad (3.14)$$

где K_1 – коэффициент пропорциональности, Н/м³; Z – текущая деформация грунта.

Тогда сила реакции грунта на рабочем органе

$$P = \sigma S = K_1 Z S. \quad (3.15)$$

Текущую деформацию грунта Z представим как функцию времени

$$Z = \frac{U_1}{2} t, \quad (3.16)$$

где $\frac{U_1}{2}$ – среднее значение скорости движения рабочего органа на данном отрезке времени.

С учетом формул (3.15), (3.16) интеграл (3.13) получит вид

$$\sum S(F) = (m_1 + m_2) g \int_0^{\tau} dt - \frac{SK_1 U_1}{2} \int_0^{\tau} t dt. \quad (3.17)$$

После интегрирования, принимая во внимание $Z_{\max} = \frac{U_1 \tau}{2}$, $\sigma_{\max} = K_1 Z_{\max}$, получим

$$\sum S(F) = (m_1 + m_2) g \tau - \frac{\sigma_{\max}}{2} \tau S, \quad (3.18)$$

где τ – время деформации грунта при ударе; $\sigma_{\max} / 2$ – среднее контактное напряжение в конечной стадии уплотнения грунта.

Подставляя в формулу (3.12) полученные значения, имеем

$$-(m_1 + m_2)U_1 = (m_1 + m_2)g\tau - \frac{\sigma_{\max}}{2}\tau S.$$

Откуда получим

$$\frac{\sigma_{\max}}{2} = \frac{(m_1 + m_2)U_1}{\tau S} + \frac{(m_1 + m_2)g}{S}. \quad (3.19)$$

Вводя новые обозначения величин, окончательно запишем

$$\frac{\sigma_{\max}}{2} = \sigma_{\text{дин}} + \sigma_{\text{ст}}. \quad (3.20)$$

Согласно уравнению (3.19) видно, что среднее значение напряжений в контакте рабочего органа с грунтом равно сумме средней динамической и средней статической составляющих напряжения за время удара.

Из формулы (3.19) имеем

$$\sigma_{\text{дин}} = \frac{(m_1 + m_2)U_1}{\tau S}; \quad (3.21)$$

$$\sigma_{\text{ст}} = \frac{(m_1 + m_2)g}{S}. \quad (3.22)$$

Профессор Н.Я.Хархута ввел в теорию ударного уплотнения грунта удельный ударный импульс, определяемый по формуле (2.17):

$$i = \frac{(m_1 + m_2)U_1}{S}. \quad (3.23)$$

Используя формулу (3.23), можно получить

$$\sigma_{\text{дин}}\tau = i, \quad \text{или} \quad \frac{\sigma_{\max}}{2}\tau = i. \quad (3.24)$$

Полученное уравнение (3.24) можно рассматривать как закон ударного уплотнения грунта, согласно которому произведение среднего динамического контактного напряжения и времени удара равно удельному ударному импульсу.

Значения $\sigma_{\text{дин}}$ приведены на рис. 3.1.

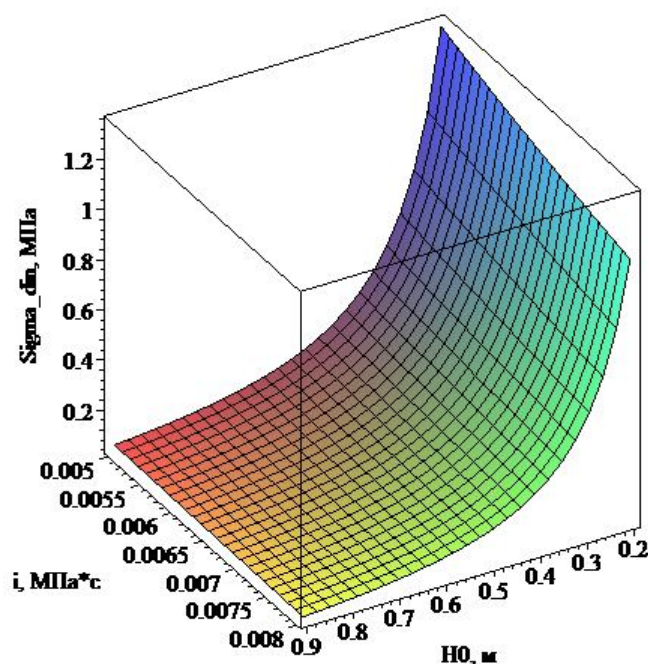


Рис. 3.1. Зависимость динамических напряжений $\sigma_{\text{дин}}$ на поверхности грунта от удельного ударного импульса и толщины уплотняемого слоя грунта ($m_1 = 100$ кг, $V_1 = 5$ м/с, $\alpha = 1,3$ – для несвязных грунтов)

Закон ударного уплотнения характеризует процесс уплотнения как саморегулируемый процесс, в котором при первом ударе рабочего органа о рыхлый грунт $\sigma_{\text{дин}}$ имеет минимальное значение.

При последующих ударах по одному месту возрастает прочность грунта и контактные напряжения, а время удара уменьшается в соответствии с законом ударного уплотнения (3.24).

Согласно исследованиям процесса ударного уплотнения грунта рабочий процесс уплотнения будет наиболее эффективным, если средние контактные напряжения в площадке контакта рабочего органа и удельный импульс близки к предельным значениям (см. табл. 2.6).

Выведем уравнение, которое связывает напряжения на поверхности грунта, параметры площади контакта, характеристики грунта с параметрами ударного механизма.

Из формулы (3.19), пренебрегая составляющей $\sigma_{\text{ст}}$ ввиду малости и учитывая выражение (3.21), можно записать

$$\sigma_{\text{max}} = \frac{2(m_1 + m_2)U_1}{\tau S}. \quad (3.25)$$

По аналогии с формулой (3.16) можно получить

$$\tau = \frac{2\lambda_{Z\max}}{U_1}. \quad (3.26)$$

Тогда формулу (3.25) можно записать в виде

$$\sigma_{\max} = \frac{(m_1 + m_2)U_1^2}{\lambda_{Z\max} S}. \quad (3.27)$$

Учитывая формулу (3.23), можно представить это выражение следующим образом:

$$\sigma_{\max} = \frac{iU_1}{\lambda_{Z\max}}, \quad (3.28)$$

$$\text{или} \quad \lambda_{Z\max} = \frac{iU_1}{\sigma_{\max}}. \quad (3.29)$$

Решая совместно уравнение (3.1) с уравнением (3.29), найдем

$$\sigma_{\max} = \sqrt{\frac{iU_1 E}{\omega B(1 - \mu^2)}} = \sqrt{\frac{iU_1 E}{h_T}}. \quad (3.30)$$

Полученное уравнение можно считать основным уравнением рабочего процесса ударного уплотнения грунтов, т.к. оно связывает основные параметры процесса.

Из формулы (3.30) видно, что контактные напряжения, возникающие при уплотнении грунта, зависят от модуля деформации грунта E и при одном и том же ударном импульсе и скорости удара U_1 они в процессе уплотнения грунта будут возрастать с повышением прочности грунта и увеличением модуля деформации грунта E .

Из формулы (3.30) можно найти значение требуемой скорости удара $V_1 = U_1$, необходимой для обеспечения заданного контактного напряжения $\sigma_0 = \sigma_{\max}$ на поверхности грунта:

$$V_1 = U_1 = \frac{\sigma_{\max}^2 \omega B(1 - \mu^2)}{Ei}. \quad (3.31)$$

На рис. 3.2 представлены зависимости требуемой скорости удара при уплотнении различных грунтов трамбующей плитой с шири-

ной плиты $B = 0,4$ м. Исходные данные грунтов приведены в табл. 3.4 .

Таблица 3.4

Исходные данные грунтов

Тип грунта	i , МПа·с	σ_0 , МПа	μ	E , МПа
Супесь	0,005...0,008	0,3...0,7	0,25	6,0
Суглинок	0,010...0,014	0,8...1,15	0,25	6,0
Тяжелый суглинок	0,016...0,020	1,20...1,55	0,30	6,0

Аналитически установлен диапазон скоростей удара от 1,0 до 5,4 м/с при уплотнении до плотности $\delta = (0,95...0,91)\delta_{\max}$ малосвязных грунтов ($i = 0,005...0,008$ МПа·с, $\sigma_0 = 0,4...0,7$ МПа); для грунтов средней связности диапазон скоростей от 2,5 до 7,3 м/с ($i = 0,010...0,014$ МПа·с, $\sigma_0 = 0,80...1,15$ МПа); для грунтов высокой связности диапазон скоростей от 3,8 до 8,0 м/с ($i = 0,016...0,020$ МПа·с, $\sigma_0 = 1,2...1,5$ МПа).

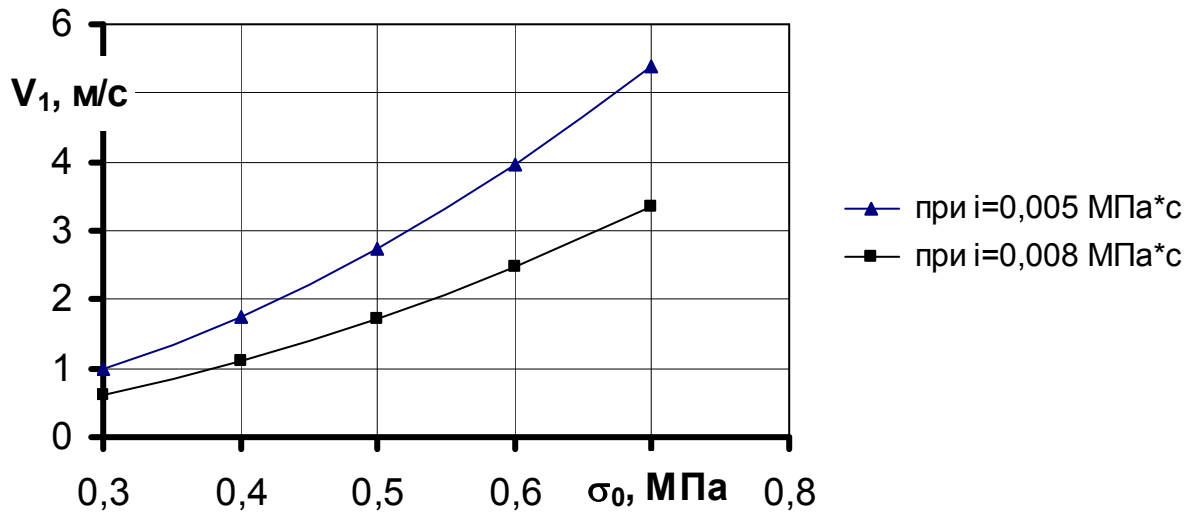
Используя формулу (3.24) и выражение (3.30) для σ_{\max} , можно определить время удара τ :

$$\tau = \frac{2i}{\sigma_{\max}} = 2 \sqrt{\frac{ih_T}{U_1 E}} = 2 \sqrt{\frac{i\omega B(1 - \mu^2)}{U_1 E}}. \quad (3.32)$$

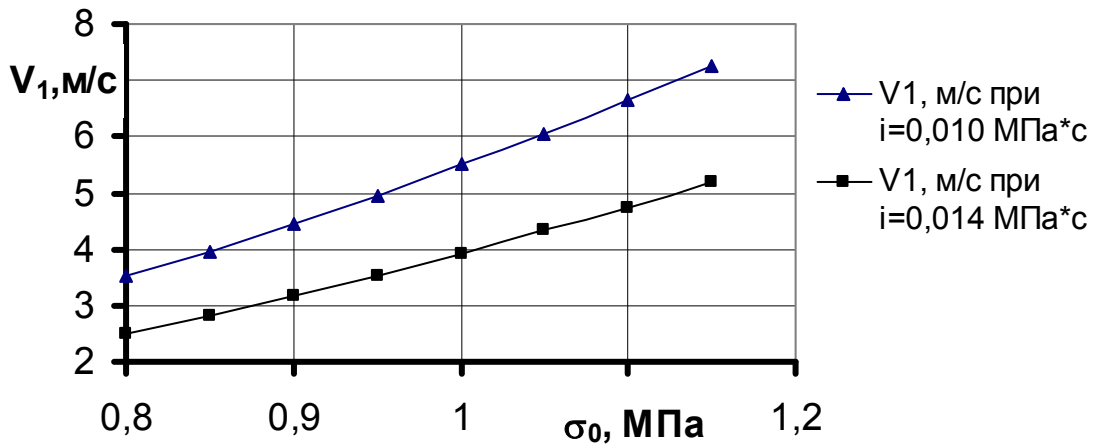
Из формулы (3.32) видно, что время удара зависит от скорости удара U_1 , модуля деформации грунта E , коэффициента Пуассона μ и удельного ударного импульса i .

В табл. 3.5 приведены значения времени удара, подсчитанные по уравнению (3.32) для различных значений модуля деформации грунта и удельного ударного импульса i (при $B = 0,8$ м ; $\omega = 1,07$; $\mu = 0,3$; $U_1 = V_1 = 5,0$ м/с).

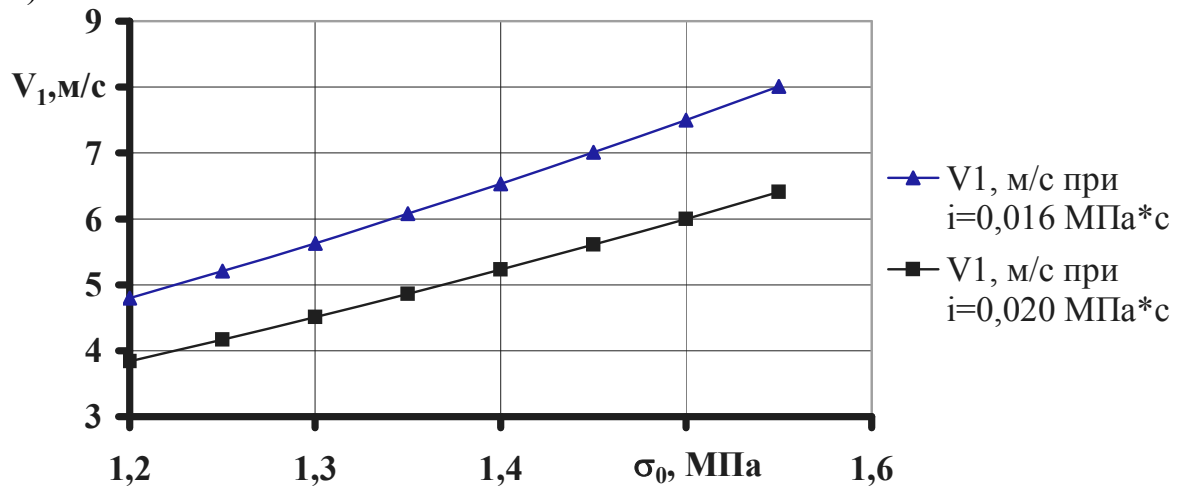
а)



б)



в)



Р

ис. 3.2. Зависимость скорости удара V_1 от контактных напряжений σ_0 :
 а – супесь; б – суглинок; в – тяжелый суглинок

Таблица 3.5

Время удара τ , с

Модуль деформации грунта E , МПа	Удельный ударный импульс i , МПа·с				
	0,005	0,010	0,015	0,020	0,025
1,0	0,056	0,079	0,097	0,112	0,125
2,0	0,039	0,056	0,068	0,079	0,088
3,0	0,032	0,046	0,056	0,064	0,072
4,0	0,028	0,039	0,048	0,056	0,062
5,0	0,025	0,035	0,043	0,050	0,056
6,0	0,023	0,032	0,039	0,046	0,051
7,0	0,021	0,030	0,036	0,042	0,047
8,0	0,020	0,028	0,034	0,039	0,044
9,0	0,019	0,026	0,032	0,037	0,042
10,0	0,018	0,025	0,030	0,035	0,039
11,0	0,017	0,024	0,029	0,034	0,038
12,0	0,016	0,023	0,028	0,032	0,036
13,0	0,015	0,022	0,027	0,031	0,035
14,0	0,015	0,021	0,026	0,030	0,033
15,0	0,014	0,020	0,025	0,029	0,032
16,0	0,014	0,020	0,024	0,028	0,031
17,0	0,014	0,019	0,023	0,027	0,030
18,0	0,013	0,019	0,023	0,026	0,029
19,0	0,013	0,018	0,022	0,026	0,029
20,0	0,012	0,018	0,022	0,025	0,028

На рис. 3.3 представлены графические зависимости времени удара τ от модуля деформации грунта E (при различных значениях удельного ударного импульса i). Из графиков видно, что с повышением модуля деформации грунта E при уплотнении грунта происходит уменьшение времени удара τ , что необходимо учитывать при проектировании трамбуемого рабочего органа, т.е. время задержки взвода гидроударника должно быть больше максимального значения времени удара, соответствующего начальной стадии уплотнения грунта, т.е. должно выполняться условие

$$t_{\text{зад}} \geq \tau_{\text{max}} \cdot \quad (3.33)$$

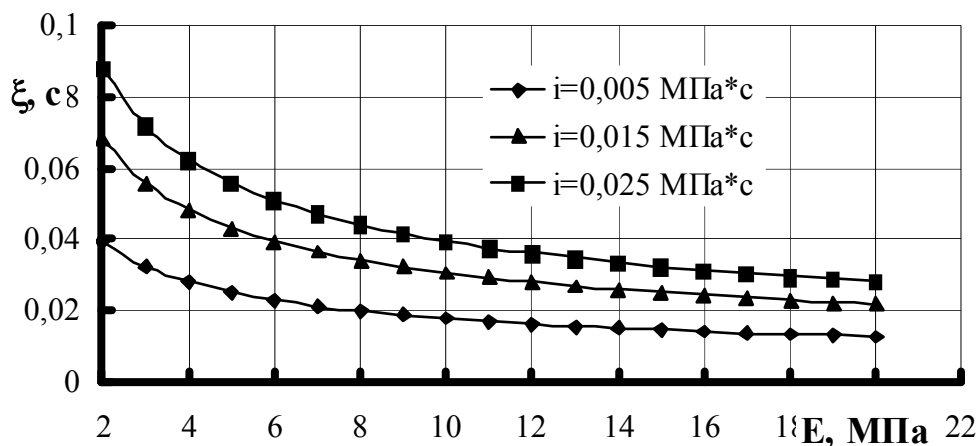


Рис. 3.3. Зависимость времени удара τ при уплотнении грунта от модуля деформации грунта E (при различных значениях удельного ударного импульса i)

В табл. 3.6 приведены результаты расчета времени удара по формуле (3.32) и сравнение их с экспериментальными данными, полученными проф. Н.Я.Хархутой (см. табл. 2.4). Значения времени удара, подсчитанные по уравнению (3.32), дают хорошую сходимость с экспериментальными данными. Средняя относительная погрешность не превышает 10...15 %.

3.2. Вывод уравнений регрессии для параметров взаимодействия трамбуемого рабочего органа с грунтом

Из уравнения (2.18) следует, что, зная параметры удара рабочего органа с грунтом (время удара τ , коэффициент α), можно определить контактные напряжения на поверхности грунта.

Пользование табличными значениями для указанных параметров при проектировании трамбуемого рабочего органа, в частности гидротрамбовки, представляет известные трудности.

Использование современных методов математической теории планирования эксперимента [1, 16, 17] позволяет обобщить материалы исследований по определению параметров удара в виде математических моделей-уравнений регрессии, которые также могут быть применены при определении параметров трамбуемых рабочих органов.

Таблица 3.6

Сравнение расчетных значений времени удара τ
с экспериментальными

Удельный ударный импульс i , МПа·с	Относительная плотность грунта δ/δ_{\max}			
	0,85	0,90	0,95	1,0
	Состояние грунта			
	рыхлый	малой плотности	почти плотный	плотный
	Модуль деформации грунта E , МПа (среднее значение)			
	1,0...5,0 (3,0)	5,0...10,0 (7,5)	10,0...15,0 (12,5)	15,0...20,0 (17,5)
	Время удара τ , с			
0,005	0,032 (0,030)	0,020 (0,020)	0,016 (0,015)	0,013 (0,010)
0,010	0,046 (0,050)	0,029 (0,030)	0,022 (0,020)	0,019 (0,015)
0,015	0,056 (0,065)	0,035 (0,040)	0,027 (0,025)	0,023 (0,015)
0,020	0,064 (0,080)	0,041 (0,050)	0,032 (0,030)	0,027 (0,015)
0,025	0,072 (0,095)	0,046 (0,060)	0,035 (0,035)	0,030 (0,020)

Примечание. В таблице выделенным шрифтом в скобках показаны экспериментальные значения, полученные проф. Н.Я.Хархутой (табл. 2.4).

Был использован полный факторный эксперимент (ПФЭ) типа 2^2 .

Факторами, влияющими на значение коэффициента α , являются:

- а) скорость удара (фактор $\tilde{\chi}_1$);
- б) удельное статическое давление (фактор $\tilde{\chi}_2$).

В табл. 3.7 приведены уровни факторов и интервалы их варьирования.

Таблица 3.7

Исходные данные для определения коэффициента α

Факторы	Уровни факторов			Интервалы варьирования
	верхний	основной	нижний	
Скорость удара V_1 , м/с	10,0	5,5	1,0	4,5

(фактор $\tilde{\chi}_1$)				
Удельное статическое давление q , МПа (фактор $\tilde{\chi}_2$)	0,045	0,025	0,005	0,020

Факторами, влияющими на значение времени удара τ , являются:

- а) удельный импульс удара (фактор $\tilde{\chi}_1$);
- б) относительная плотность грунта (фактор $\tilde{\chi}_2$).

В табл. 3.8 приведены уровни факторов и интервалы их варьирования.

Таблица 3.8

Исходные данные для определения времени удара τ

Факторы	Уровни факторов			Интервалы варьирования
	верхний	основной	нижний	
Удельный импульс i , МПа·с (фактор $\tilde{\chi}_1$)	0,025	0,015	0,005	0,010
Относительная плотность грунта $\bar{\delta} = \delta/\delta_{\max}$ (фактор $\tilde{\chi}_2$)	0,980	0,915	0,850	0,065

Матрица планирования эксперимента, содержащая условия проведения всех опытов в соответствии с выбранным планом и значения функции отклика (параметры удара) приведены в табл. 3.9.

Таблица 3.9

Матрица планирования эксперимента

Номер опыта	Факторы и их взаимодействия				Функции отклика	
	χ_0	χ_1	χ_2	$\chi_1\chi_2$	α	τ , с
1	+	-	-	+	1,5	0,030
2	+	+	-	-	3,0	0,095
3	+	-	+	-	1,1	0,010
4	+	+	+	+	1,7	0,020

По результатам эксперимента для функций отклика получено математическое описание в виде уравнения регрессии /16, 17/:

$$\hat{y} = b_0 + b_1\chi_1 + b_2\chi_2 + b_{12}\chi_1\chi_2, \quad (3.34)$$

где \hat{y} – отклик ($\hat{\alpha}$ или $\hat{\tau}$); b_0, b_1, b_2, b_{12} – коэффициенты регрессии.

После определения коэффициентов регрессии и проведения ряда преобразований получаем следующие уравнения регрессии в натуральных значениях факторов:

$$\hat{\alpha} = 1,37 + 0,179V_1 - 7,5q - 2,5V_1q ; \quad (3.35)$$

$$\hat{\tau} = 0,0546 + 21,23i - 0,0481\bar{\delta} - 21,15i\bar{\delta}. \quad (3.36)$$

На рис. 3.4, 3.5 приведено сравнение экспериментальных значений коэффициента α , времени удара τ , полученных Н.Я. Хархутой, со значениями, вычисленными по уравнениям регрессии. Максимальные относительные погрешности такого представления значений α и τ не превышают 25 % для коэффициента α и 20% для τ , средние значения относительных погрешностей составляют 6 %.

Значения коэффициента α , времени удара τ , представлены на рис. 3.6 и 3.7

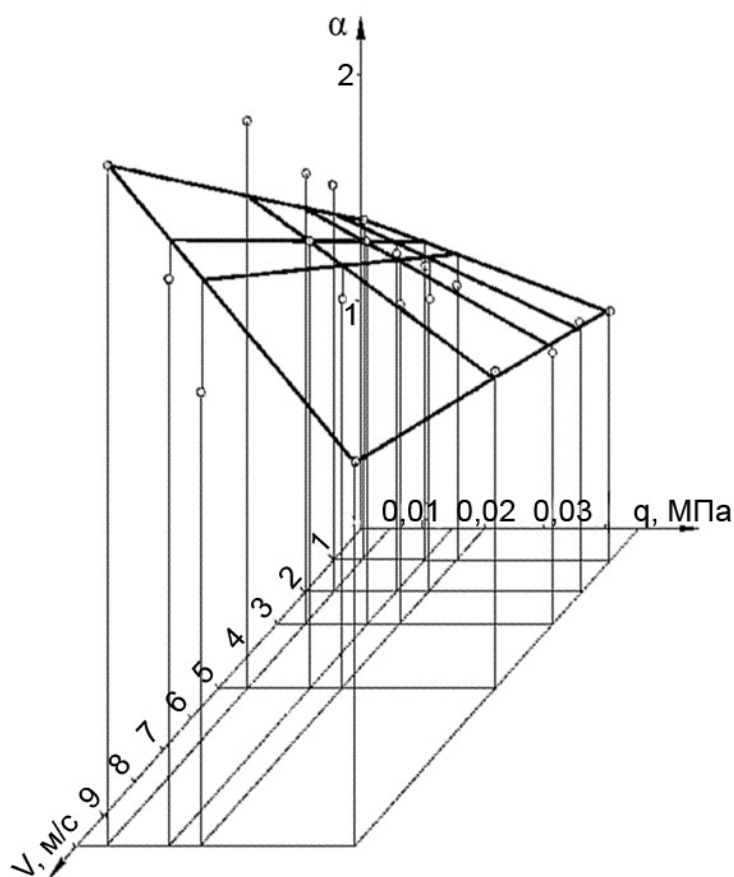


Рис. 3.4. Сравнение экспериментальных значений коэффициента α (показаны точками) со значениями, вычисленными по уравнению регрессии

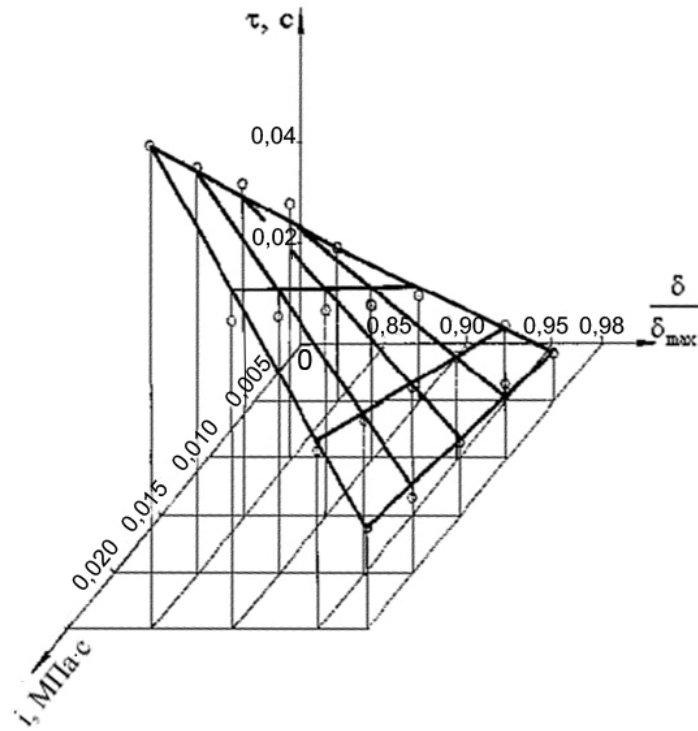


Рис. 3.5. Сравнение экспериментальных значений времени удара τ (показаны точками) со значениями, вычисленными по уравнению регрессии

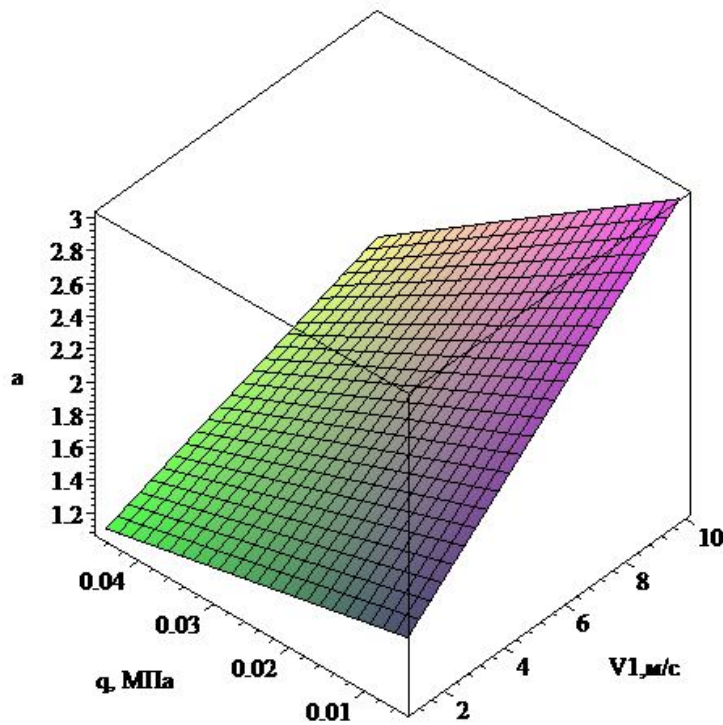


Рис. 3.6. Значения коэффициента α , вычисленные по уравнению регрессии

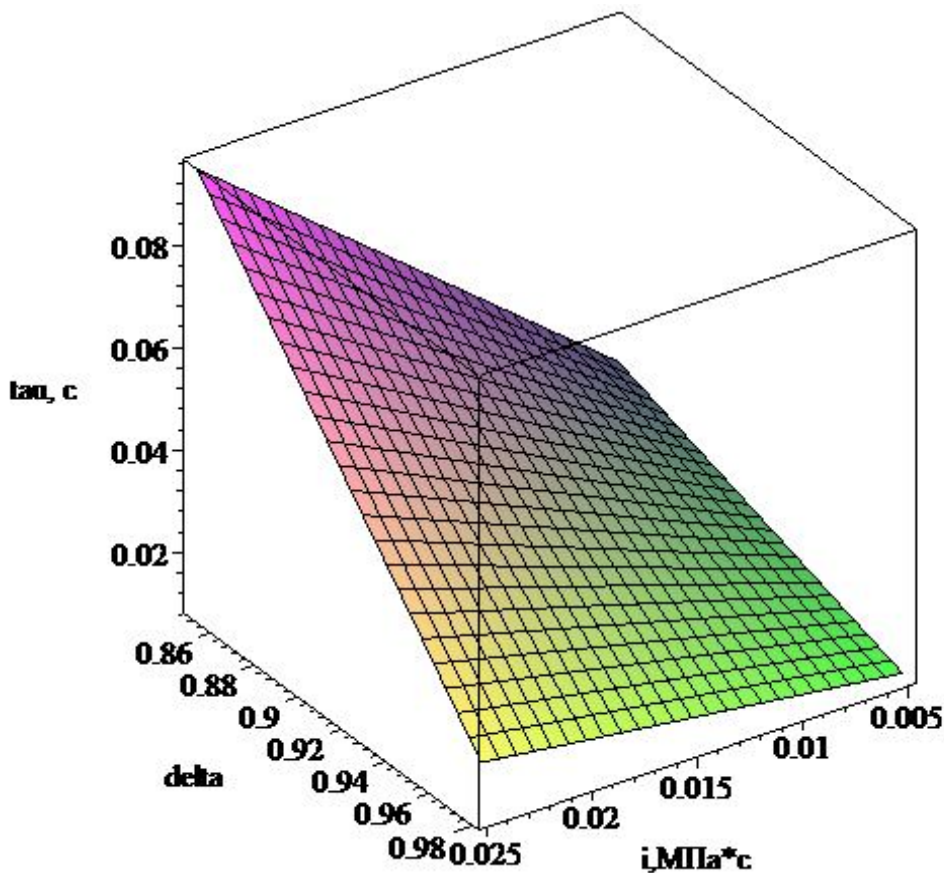


Рис. 3.7. Значения времени удара τ , вычисленные по уравнению регрессии

Уравнения регрессии (3.35), (3.36) позволяют определять параметры удара в зависимости от влияющих факторов. Использование этих уравнений дает возможность аналитического определения параметров рабочего органа ударного действия для уплотнения грунта.

3.3. Обоснование, выбор расчетной схемы и основных параметров трамбующего рабочего органа

Выбор основных параметров трамбующего рабочего органа сводится к определению массы подвижных частей, общей массы трамбующего рабочего органа, скорости в момент удара, требуемой энергии удара, а также размеров трамбующей плиты. Указанные параметры должны обеспечить получение требуемой плотности в слое грунта заданной толщины. При этом необходимо стремиться к тому, чтобы достижение требуемой плотности происходило при минимальном числе ударов. Это условие обеспечивается выбором удель-

ного импульса удара, близким к предельному, а контактного напряжения, близким к пределу прочности грунта /24/.

Рабочий орган ударного действия для уплотнения грунта – гидротрамбовка – является сменным рабочим оборудованием экскаватора и навешивается на него вместо ковша, в связи с чем общая масса гидротрамбовки не должна превышать массы ковша с грунтом.

Гидротрамбовки могут быть выполнены по четырём принципиально возможным схемам (рис. 3.8):

- а) с непосредственным ударом трамбующей плиты по грунту;
- б) с непосредственным ударом плиты по грунту и дополнительной опорной (поджимной) плитой;
- в) с ударом по грунту через шабот;
- г) с ударом по грунту через шабот и дополнительной опорной (поджимной) плитой.

Первая и вторая схемы (а, б) являются предпочтительнее, так как при этом обеспечивается высокая эффективность по уплотнению и более высокий КПД удара /15/. По второй схеме уменьшается динамическое воздействие на экскаватор.

При определении параметров гидротрамбовки считается, что ее корпус жестко крепится к базовой машине.

Расчетная схема гидротрамбовки представлена на рис. 3.9. Исходными данными для расчета параметров гидротрамбовки являются:

- а) вид грунта (характеризуется удельным импульсом удара i , пределом прочности σ_p , влажностью W);
- б) требуемая плотность уплотнения грунта $\bar{\delta} = \delta / \delta_{\max}$, обычно принимается $\bar{\delta} = k = 0,98$;
- в) толщина уплотняемого слоя грунта H_0 .

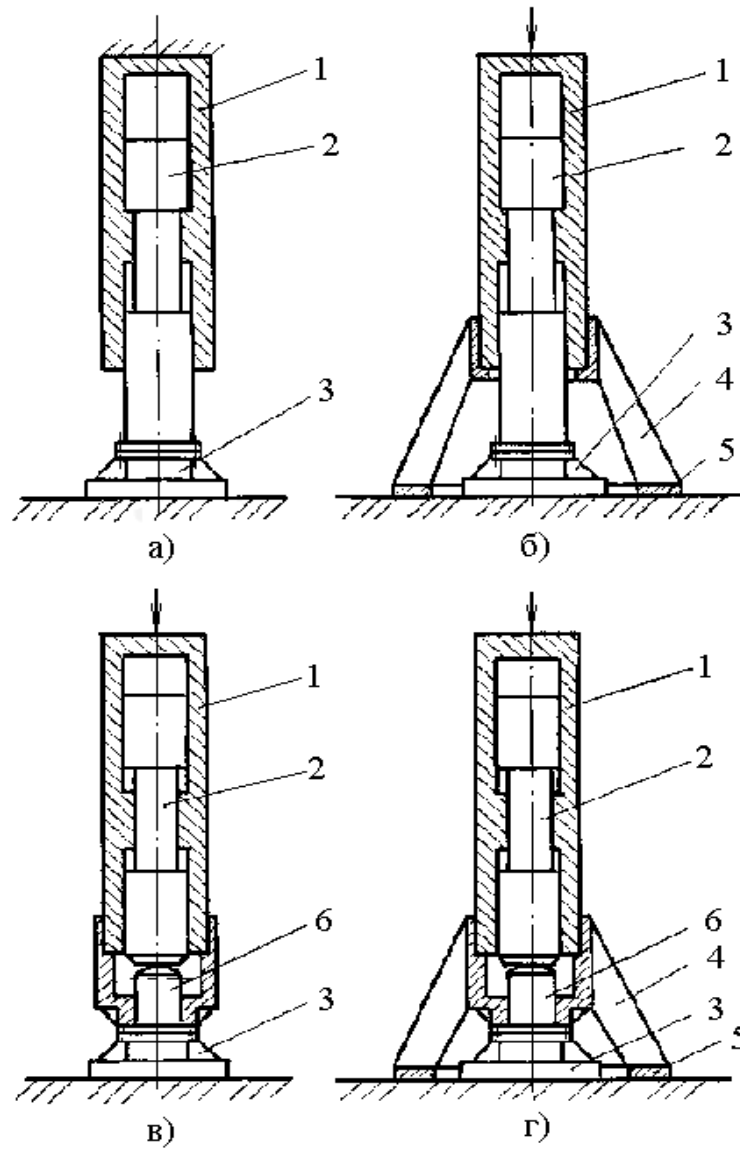


Рис. 3.8. Принципиальные схемы гидротрамбовок:
 1 – корпус; 2 – подвижные части; 3 – сменная трамбуемая плита;
 4 – кронштейн; 5 – дополнительная опорная плита; 6 – шабот

Геометрические размеры трамбуемой плиты при оптимальных влажностях грунтов выбираются из условия /24/:

$$B_{\min} \geq \frac{H_0}{\alpha \left(1 - e^{-3,7 \frac{\sigma_0}{\sigma_p}} \right)}. \quad (3.37)$$

Площадь контактной поверхности трамбующей плиты с грунтом равна $S = \pi B^2 / 4$ для круглой плиты и $S = B^2$ для квадратной плиты.

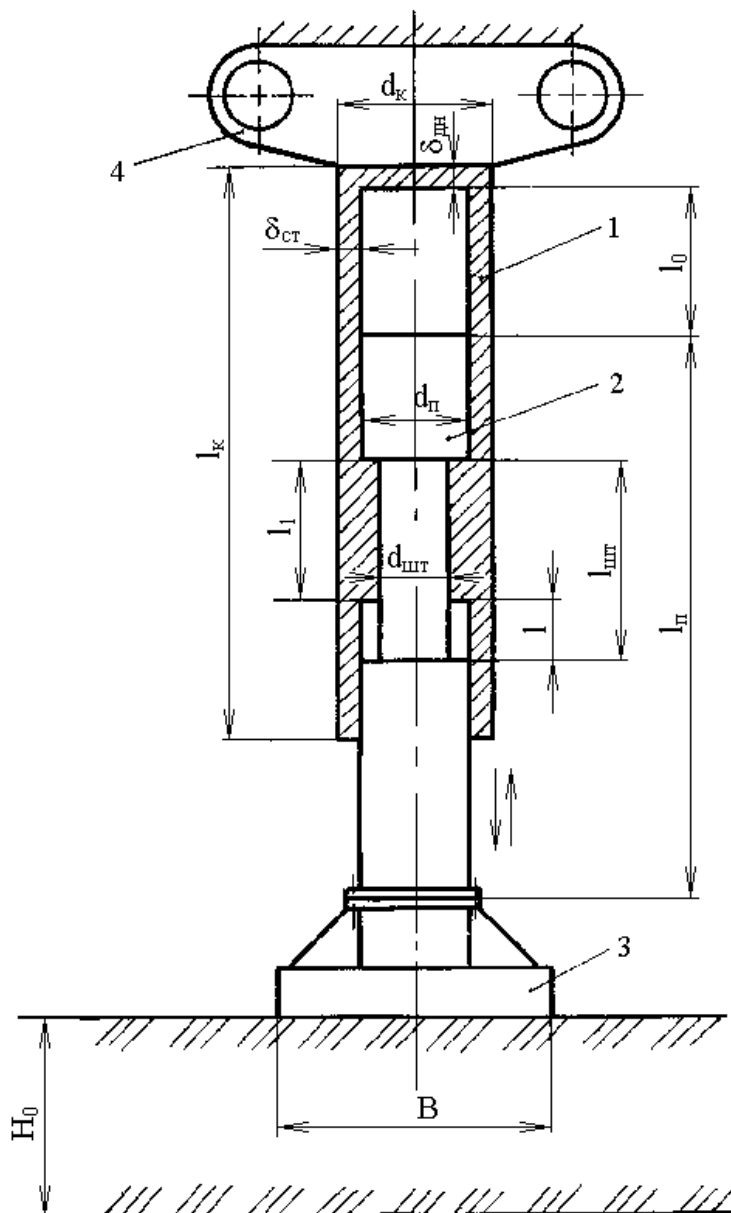


Рис. 3.9. Расчетная схема гидротрамбовки:
 1 – корпус; 2 – подвижные части; 3 – сменная трамбующая
 плита; 4 – переходный кронштейн

Значения размеров трамбующей плиты B_{\min} , вычисленные по уравнению (3.37), приведены на рис. 3.10, 3.11.

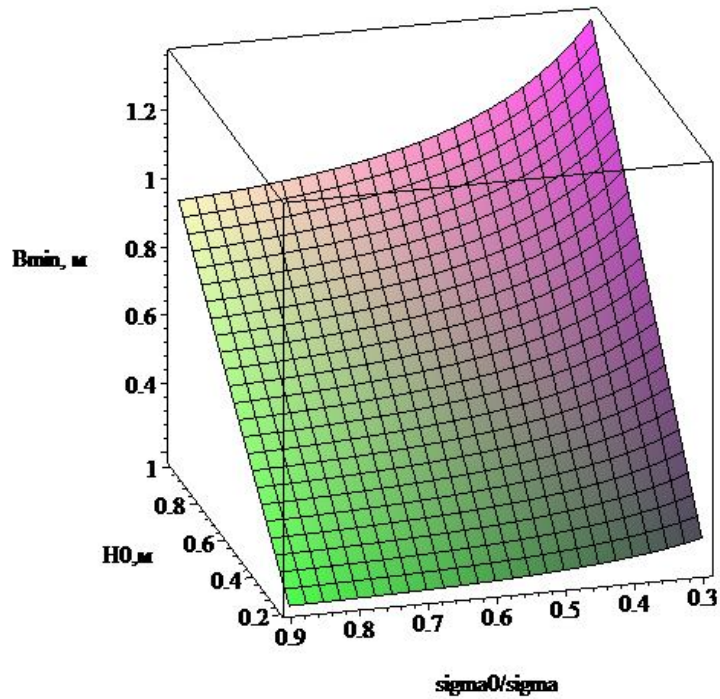


Рис. 3.10. Зависимость поперечного размера трамбующей плиты V_{\min} от толщины уплотняемого слоя грунта H_0 и отношения σ_0/σ (при $\alpha = 1,1$ – для связных грунтов)

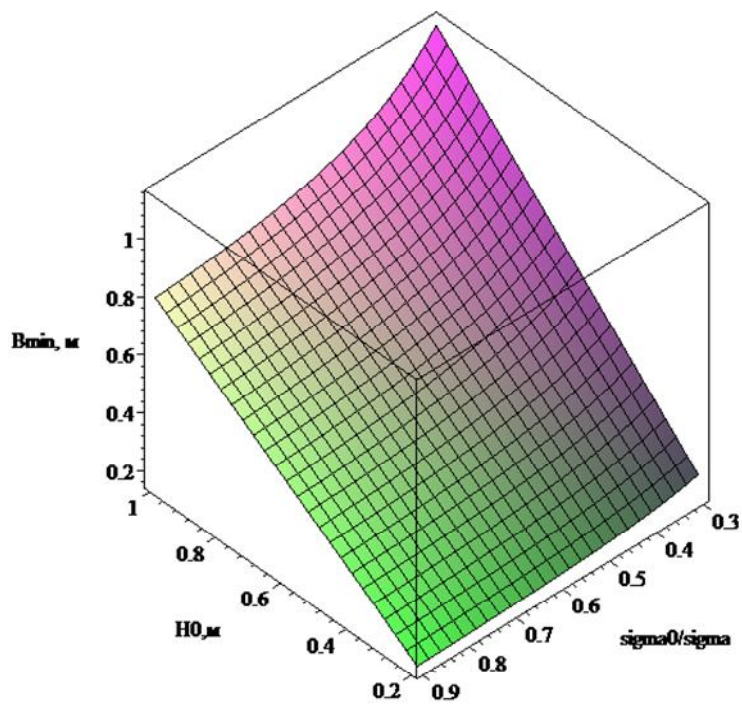


Рис. 3.11. Зависимость поперечного размера трамбующей плиты V_{\min} от толщины уплотняемого слоя грунта H_0 и отношения σ_0/σ (при $\alpha = 1,3$ – для несвязных грунтов)

Запишем выражение для удельного статического давления подвижных частей на грунт

$$q = m \cdot g / S , \quad (3.38)$$

где $g = 9,81 \text{ м/с}^2$ – ускорение свободного падения.

Приняв во внимание уравнение (2.17), можем записать следующее выражение:

$$q = i \cdot g / V_1 . \quad (3.39)$$

Запишем уравнение регрессии (3.35) с учетом формулы (3.39) в следующем виде:

$$\hat{\alpha} = a_0 + a_1 V_1 - \frac{a_2 i}{V_1} g - \frac{a_{12} V_1 i}{V_1} g, \quad (3.40)$$

где $a_0 = 1,37$; $a_1 = 0,179$; $a_2 = 7,5$; $a_{12} = 2,5$.

Проведя преобразования уравнения (3.40) и решив его относительно скорости удара, получим

$$V_1 = \frac{\hat{\alpha} + a_{12} i g - a_0 + \sqrt{(\hat{\alpha} + a_{12} i g - a_0)^2 + 4a_1 a_2 i g}}{2a_1} . \quad (3.41)$$

Надо заметить, что при решении квадратного уравнения получается два значения корня, однако отрицательное значение скорости не отвечает физическому смыслу задачи.

Значение коэффициента $\hat{\alpha} = \alpha$ в формуле (3.41) берется из формулы (2.18) с учетом значения $\hat{\tau}$, вычисленного по формуле (3.36) при $\bar{\delta} = 0,95 \dots 0,98$, т.е.

$$\alpha = \sigma_0 \hat{\tau} / i . \quad (3.42)$$

Таким образом, для получения требуемого контактного напряжения на поверхности грунта σ_0 при заданном удельном импульсе удара i необходимо обеспечить следующую скорость удара:

$$V_1 = \frac{\frac{\sigma_0 \hat{\tau}}{i} + a_{12} i g - a_0 + \sqrt{\left(\frac{\sigma_0 \hat{\tau}}{i} + a_{12} i g - a_0\right)^2 + 4a_1 a_2 i g}}{2a_1} , \quad (3.43)$$

здесь V_1 – м/с; σ_0 – МПа; i – МПа·с; $g = 9,81 \text{ м/с}^2$.

Масса подвижных частей при заданном удельном импульсе определяется по формуле

$$m = iS / V_1, \quad (3.44)$$

здесь m – кг; i – Па·с; S – м²; V_1 – м/с.

Зная массу подвижных частей и скорость удара, определим энергию удара, необходимую для уплотнения грунта по формуле

$$T = m \cdot V_i^2 / 2. \quad (3.45)$$

Формулы (3.37), (3.42), (3.44), (3.45) являются расчетными для определения параметров гидротрамбовки. На рис. 3.12 – 3.15 представлены зависимости требуемой скорости удара от величины контактных напряжений на поверхности грунта при различных значениях удельного ударного импульса для грунтов различной связности.

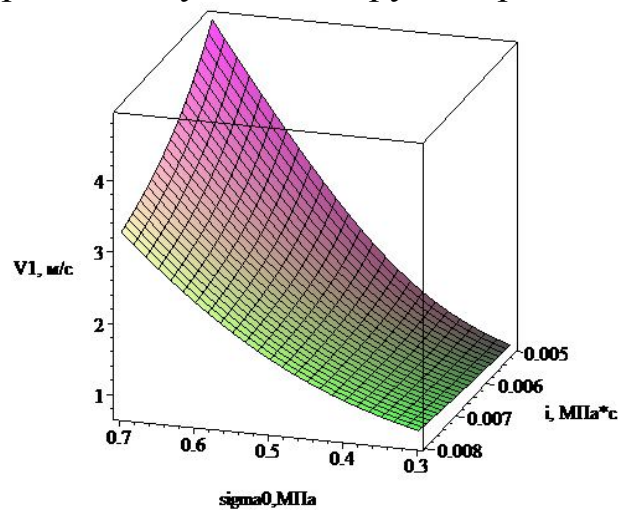


Рис. 3.12. Зависимость скорости удара от контактных напряжений на поверхности грунта при различных значениях удельного ударного импульса для супесей

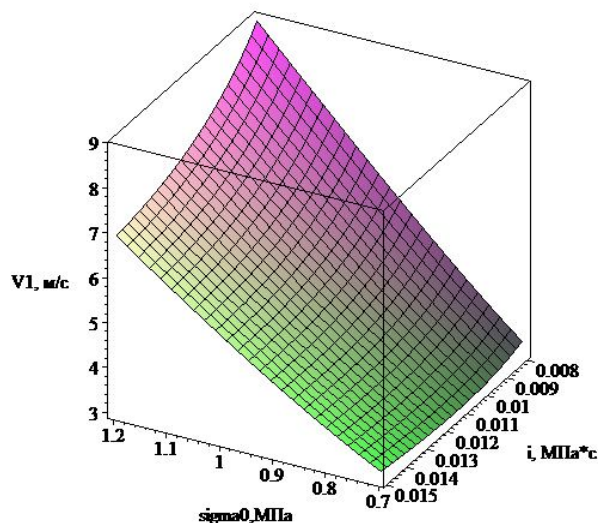


Рис. 3.13. Зависимость скорости удара от контактных напряжений на поверхности грунта при различных значениях удельного ударного импульса для суглинков

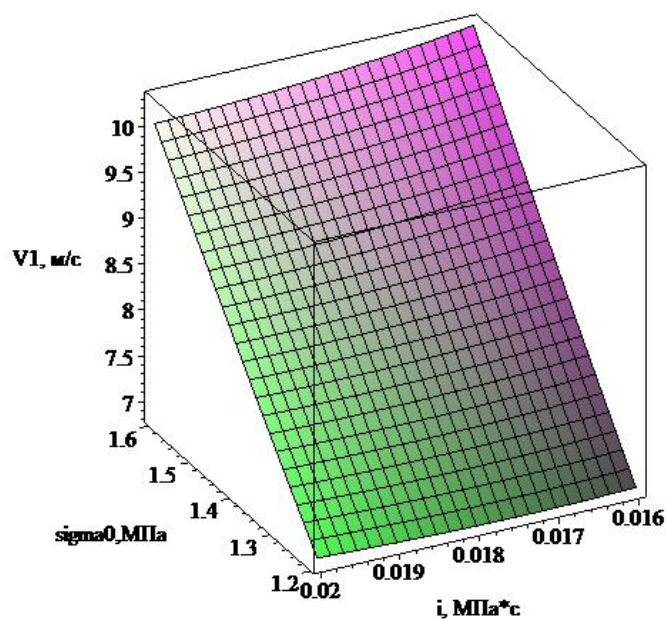


Рис. 3.14. Зависимость скорости удара от контактных напряжений на поверхности грунта при различных значениях удельного ударного импульса для тяжелых суглинков

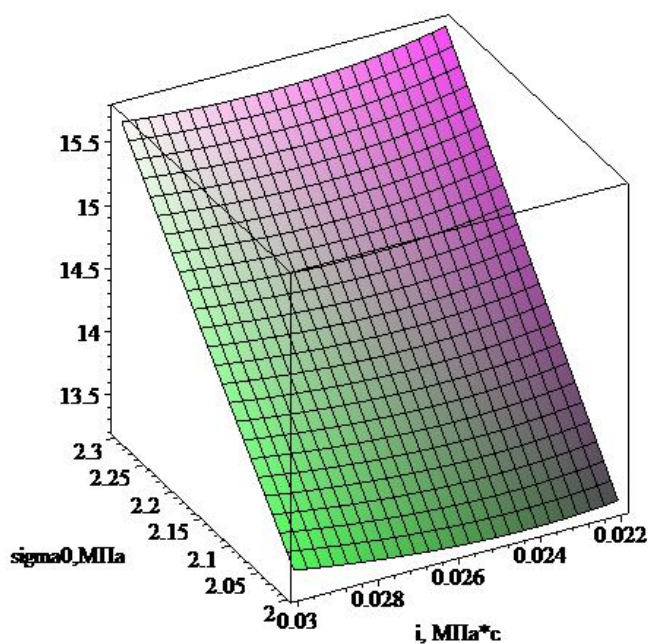


Рис. 3.15. Зависимость скорости удара от контактных напряжений на поверхности грунта при различных значениях удельного ударного импульса для глин

Зависимости, представленные на рис. 3.12...3.14, дают хорошую сходимость с графиками на рис. 3.2. Из приведенных зависимостей видно, что с увеличением требуемых контактных напряжений,

зависящих от предела прочности грунта, величина скорости удара увеличивается и находится в диапазоне от 1,2 до 4,9 м/с для мало-связных грунтов (супеси), от 3,7 до 7,3 м/с – для грунтов средней связности (суглинки), от 6,8 до 9,3 м/с – для грунтов тяжелой связности (тяжелые суглинки).

При этом следует заметить, что при указанных на рис. 3.12, 3.13, 3.14 значениях контактных напряжений, удельных ударных импульсов и скоростей удара выполняется условие (2.21) при уплотнении грунта до требуемой плотности, равной $(0,95...0,98)\delta_{\max}$.

Увеличение скорости удара при одном и том же значении удельного ударного импульса, как следует из формулы (3.44), приводит к уменьшению массы подвижных частей. Однако энергия удара пропорциональна квадрату скорости удара. Поэтому значение скорости удара должно быть рациональным, т.е. обеспечивать требуемое значение контактных напряжений с учетом данных табл. 2.5 и 2.6.

На рис. 3.16 - 3.20 представлены зависимости массы подвижных частей от толщины уплотняемого слоя грунта и удельного ударного импульса. На рис. 3.21 - 3.25 представлены зависимости энергии удара от толщины уплотняемого слоя грунта и удельного ударного импульса.

Из графиков видно, что значения массы подвижных частей и энергии удара возрастают с увеличением толщины уплотняемого слоя грунта.

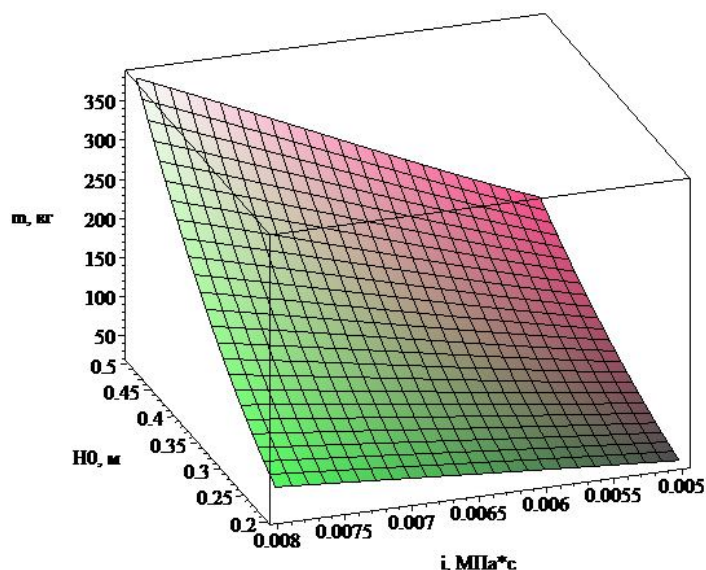


Рис. 3.16. Зависимость массы подвижных частей от толщины уплотняемого слоя грунта и удельного ударного импульса для супесей (при $\sigma_0 = 0,7$ МПа)

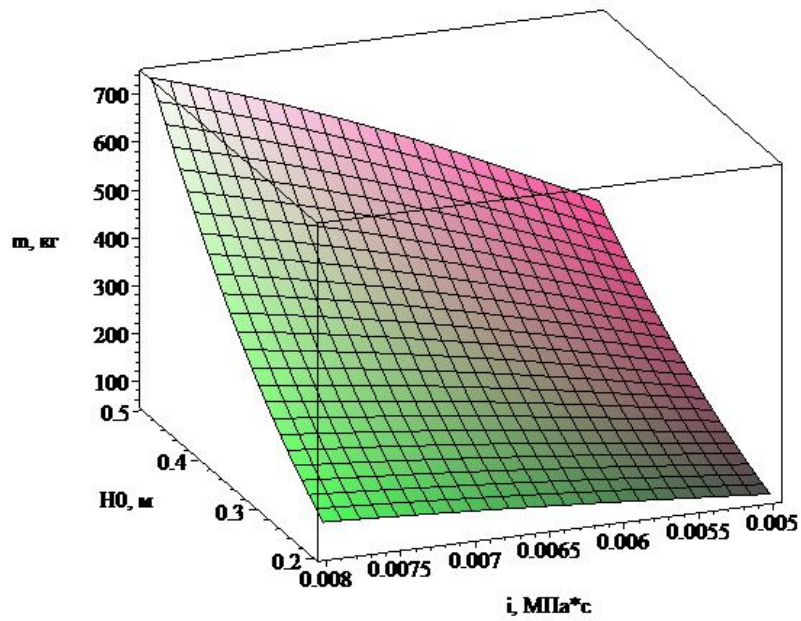


Рис. 3.17. Зависимость массы подвижных частей от толщины уплотняемого слоя грунта и удельного ударного импульса для супесей (при $\sigma_0 = 0,5$ МПа)

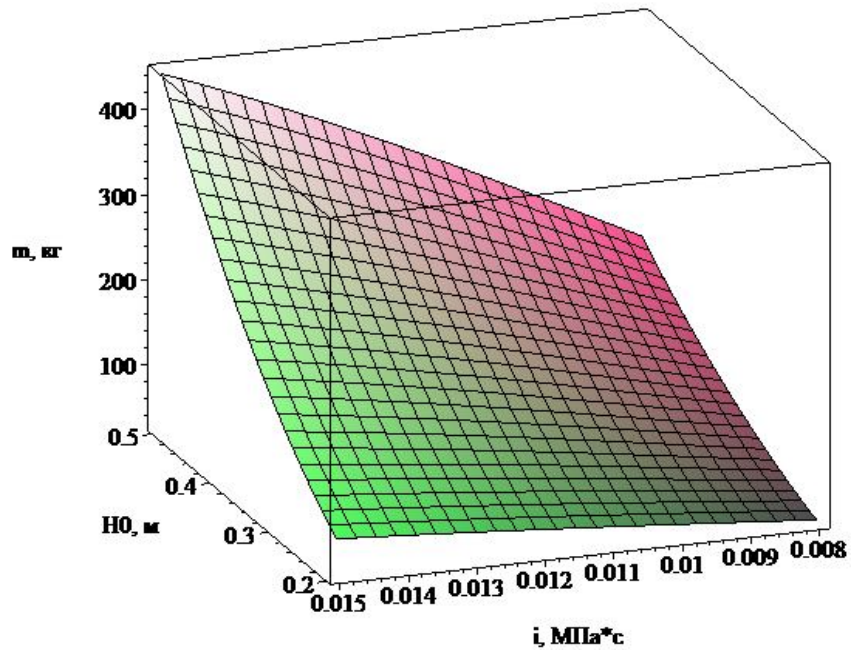


Рис. 3.18. Зависимость массы подвижных частей от толщины уплотняемого слоя грунта и удельного ударного импульса для суглинков (при $\sigma_0 = 1,0$ МПа)

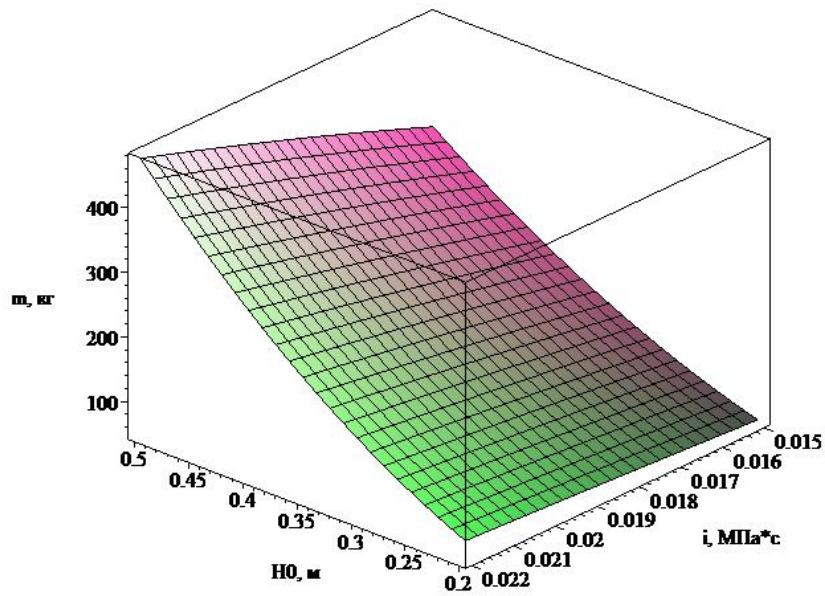


Рис. 3.19. Зависимость массы подвижных частей от толщины уплотняемого слоя грунта и удельного ударного импульса для тяжелых суглинков (при $\sigma_0 = 1,6$ МПа)

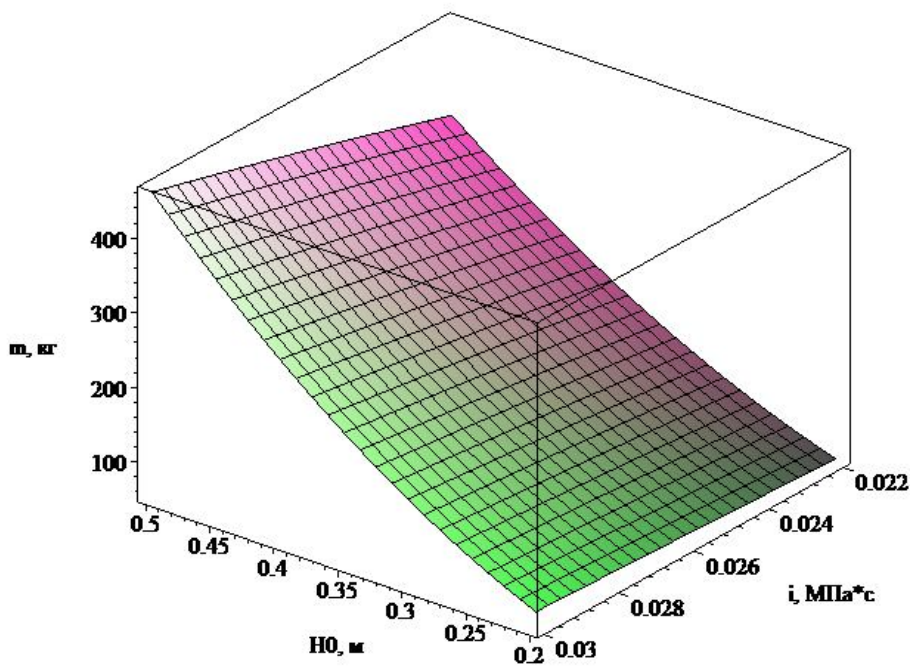


Рис. 3.20. Зависимость массы подвижных частей от толщины уплотняемого слоя грунта и удельного ударного импульса для глин (при $\sigma_0 = 2,1$ МПа)

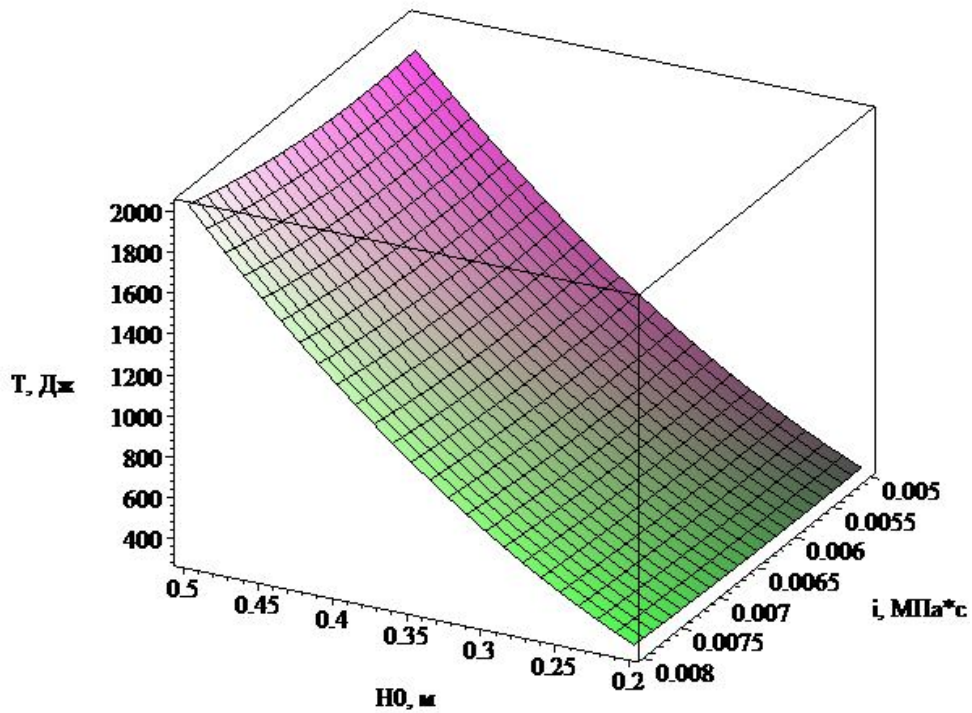


Рис. 3.21. Зависимость энергии удара от толщины уплотняемого слоя грунта и удельного ударного импульса для супесей (при $\sigma_0 = 0,7$ МПа)

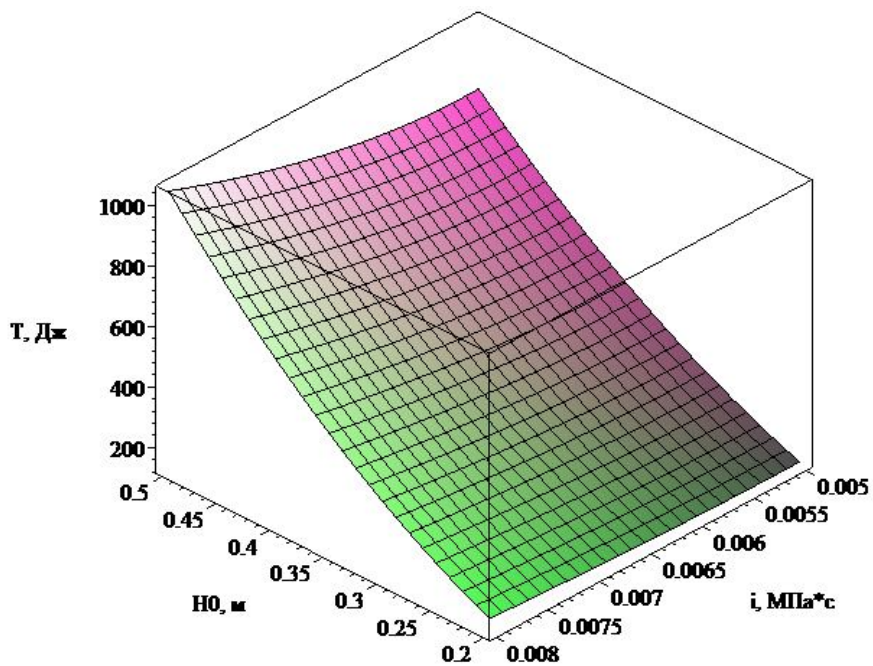


Рис. 3.22. Зависимость энергии удара от толщины уплотняемого слоя грунта и удельного ударного импульса для супесей (при $\sigma_0 = 0,5$ МПа)

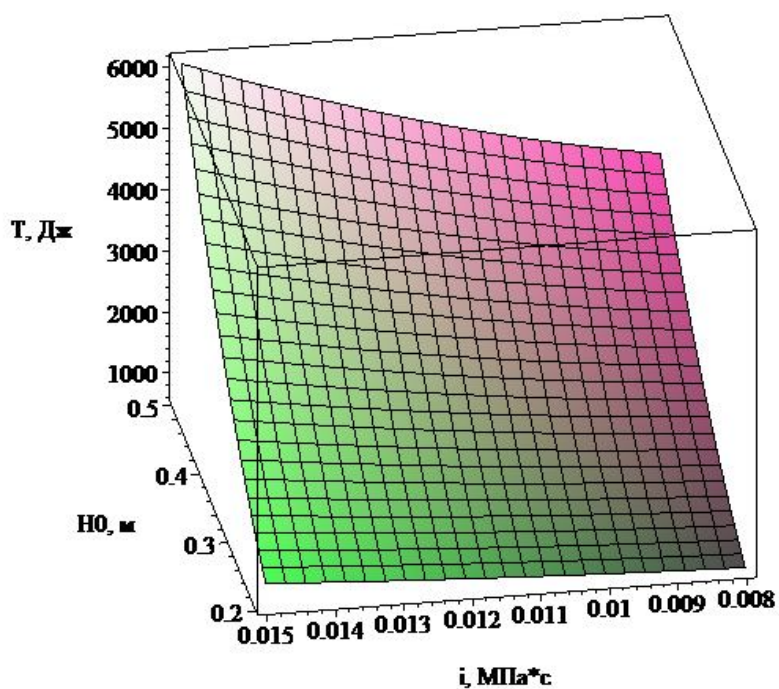


Рис. 3.23. Зависимость энергии удара от толщины уплотняемого слоя грунта и удельного ударного импульса для суглинков (при $\sigma_0 = 1,0$ МПа)

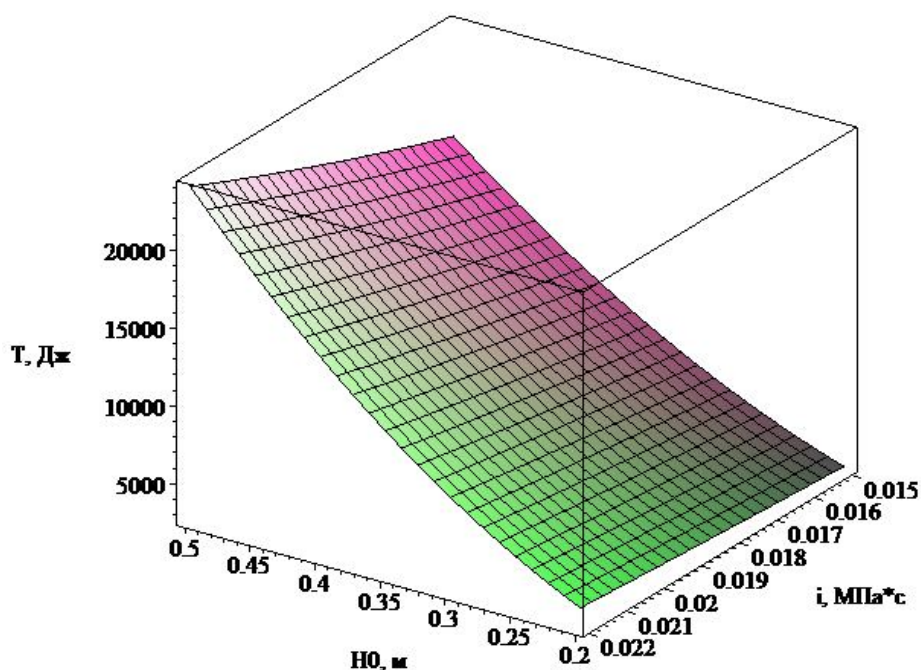


Рис. 3.24. Зависимость энергии удара от толщины уплотняемого слоя грунта и удельного ударного импульса для тяжелых суглинков (при $\sigma_0 = 1,6$ МПа)

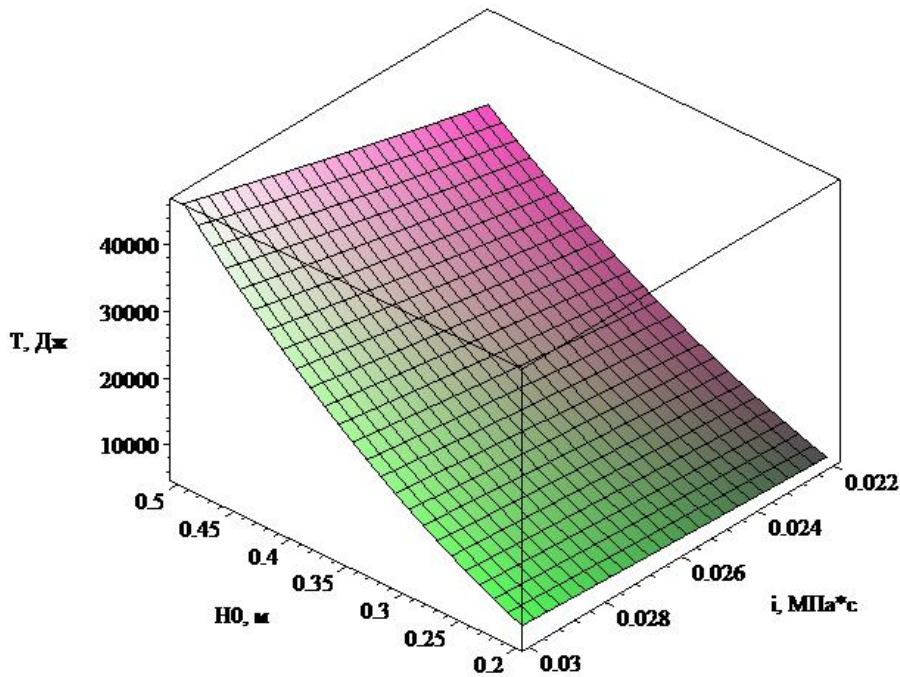


Рис. 3.25. Зависимость энергии удара от толщины уплотняемого слоя грунта и удельного ударного импульса для глин (при $\sigma_0 = 2,1$ МПа)

Из графиков также видно, что, например, гидротрамбовкой с энергией удара до 2000...3000 Дж, что соответствует энергии удара гидроударных рабочих органов, навешиваемых на экскаваторы III размерной группы, можно уплотнять малосвязные грунты ($i = 0,006$ МПа·с) на толщину до 0,6...0,7 м, грунты средней связности ($i = 0,01$ МПа·с) – на толщину до 0,45 м, грунты высокой связности ($i = 0,016$ МПа·с) – на толщину до 0,3...0,35 м.

Повышение толщины уплотняемого слоя грунта при одной и той же скорости удара связано с увеличением массы подвижных частей и энергии удара.

На рис. 3.26, 3.28, 3.30, 3.32 представлены зависимости массы подвижных частей и энергии удара от толщины уплотняемого слоя грунта и контактных напряжений на поверхности грунта. На рис. 3.27, 3.29, 3.31, 3.33 представлены зависимости энергии удара от толщины уплотняемого слоя грунта и контактных напряжений на поверхности грунта.

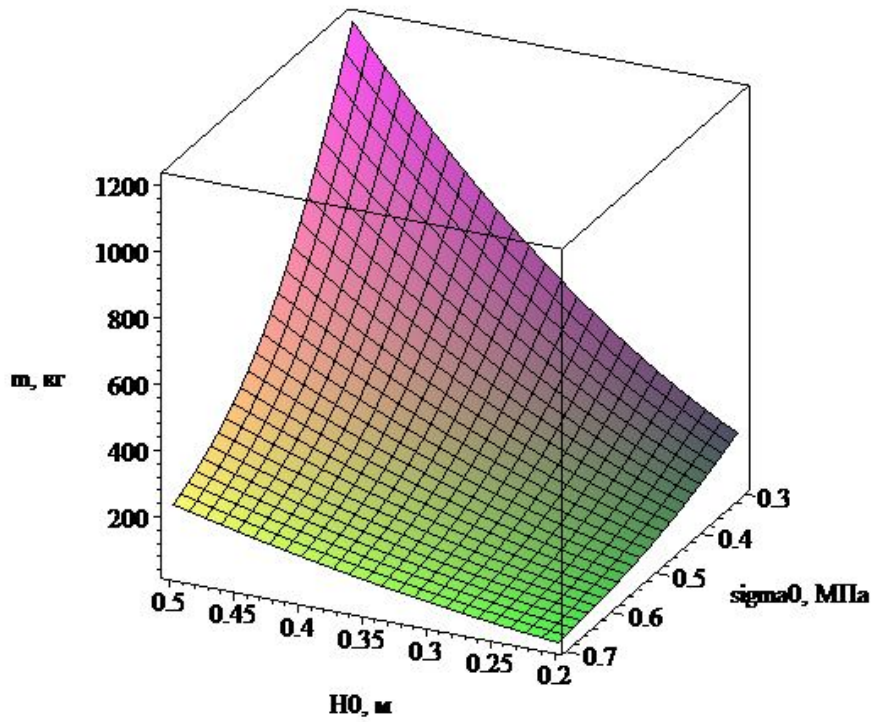


Рис. 3.26. Зависимость массы подвижных частей от толщины уплотняемого слоя грунта и контактных напряжений на поверхности грунта для супесей (при $i = 0,006 \text{ МПа}\cdot\text{с}$)

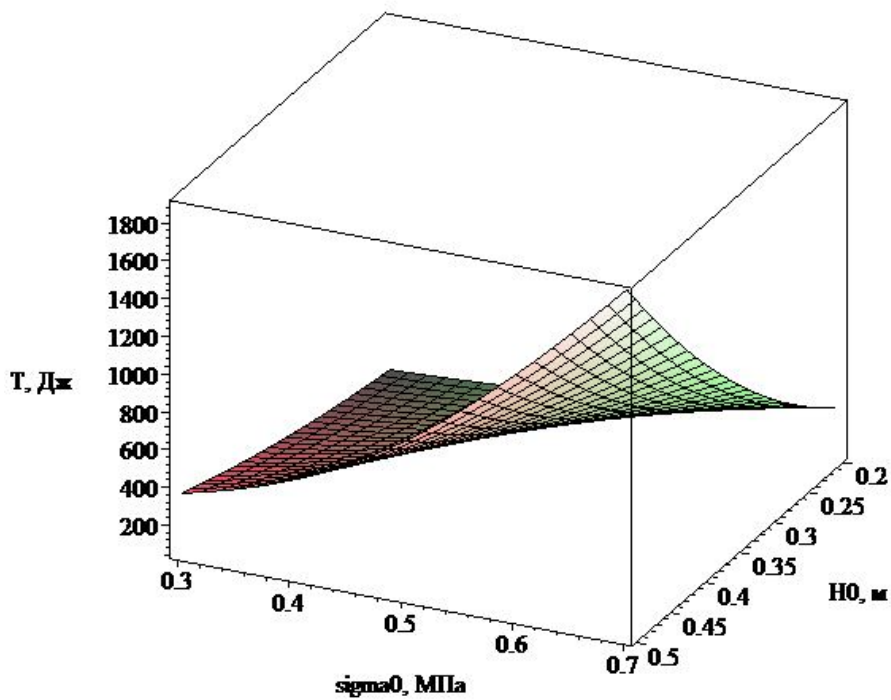


Рис. 3.27. Зависимость энергии удара от толщины уплотняемого слоя грунта и контактных напряжений на поверхности грунта для супесей (при $i = 0,006 \text{ МПа}\cdot\text{с}$)

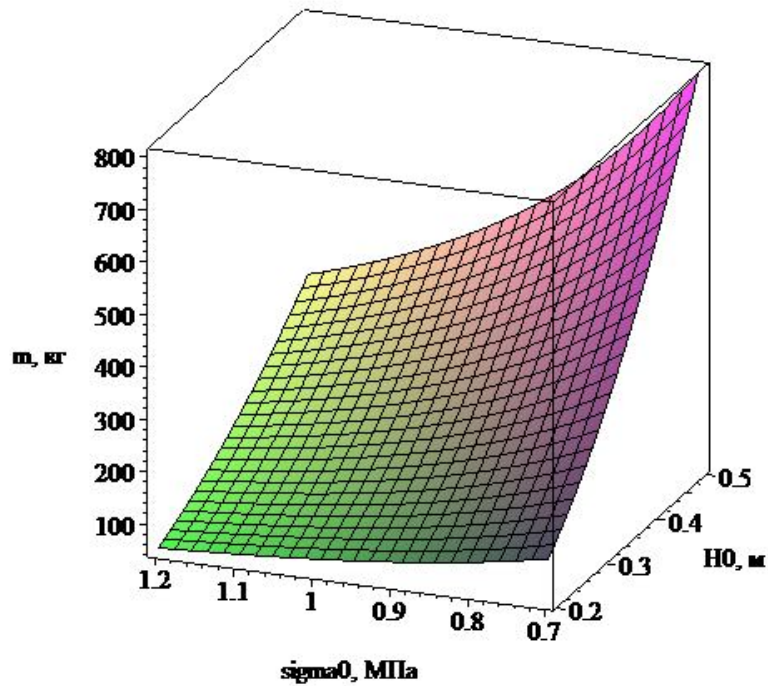


Рис. 3.28. Зависимость массы подвижных частей от толщины уплотняемого слоя грунта и контактных напряжений на поверхности грунта для суглинков (при $i = 0,011 \text{ МПа}\cdot\text{с}$)

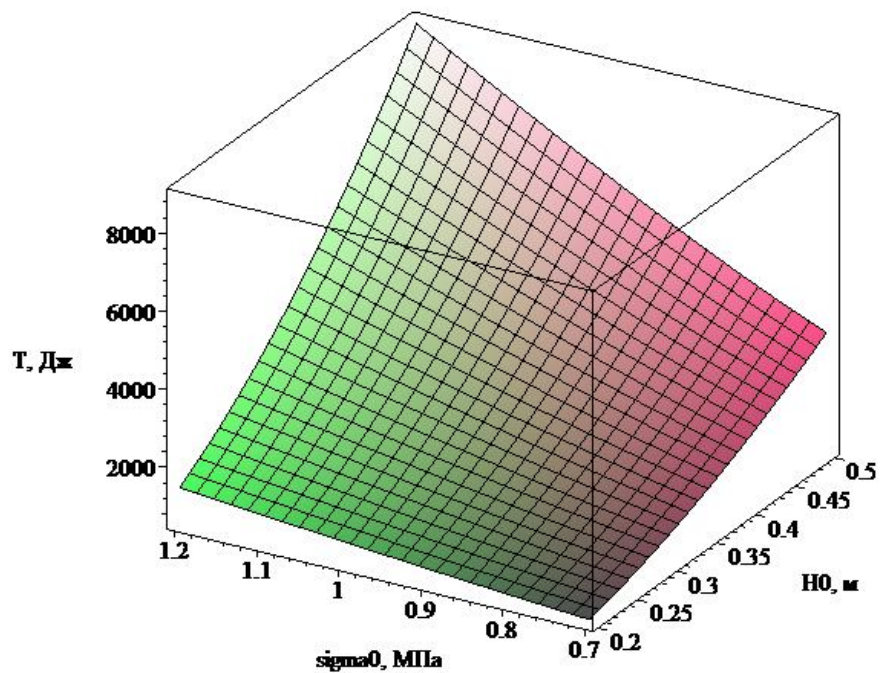


Рис. 3.29. Зависимость энергии удара от толщины уплотняемого слоя грунта и контактных напряжений на поверхности грунта для суглинков (при $i = 0,011 \text{ МПа}\cdot\text{с}$)

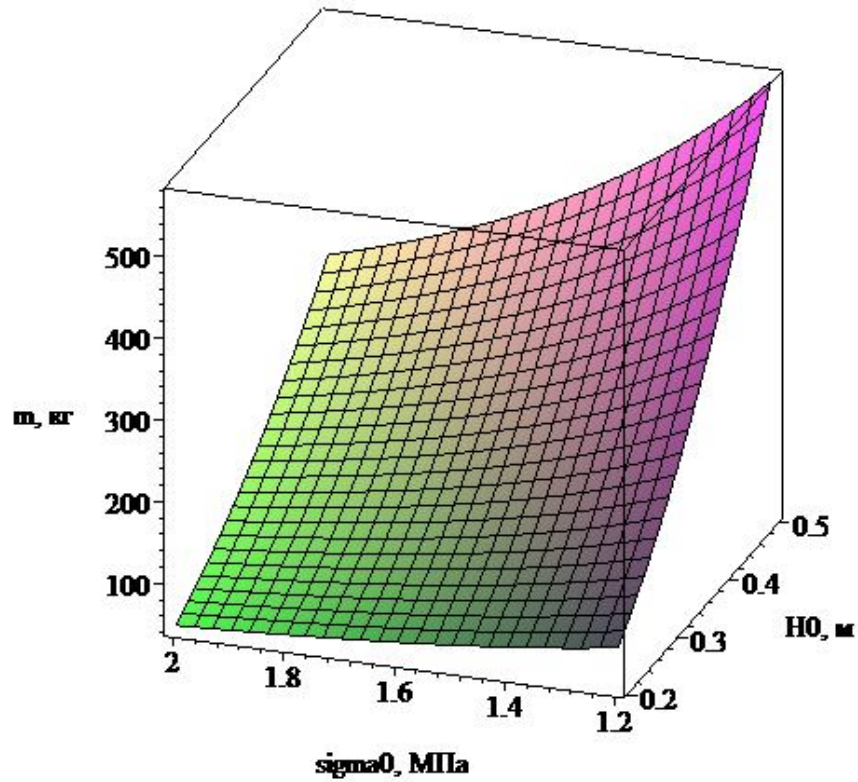


Рис. 3.30. Зависимость массы подвижных частей от толщины уплотняемого слоя грунта и контактных напряжений на поверхности грунта для тяжелых суглинков (при $i = 0,018 \text{ МПа}\cdot\text{с}$)

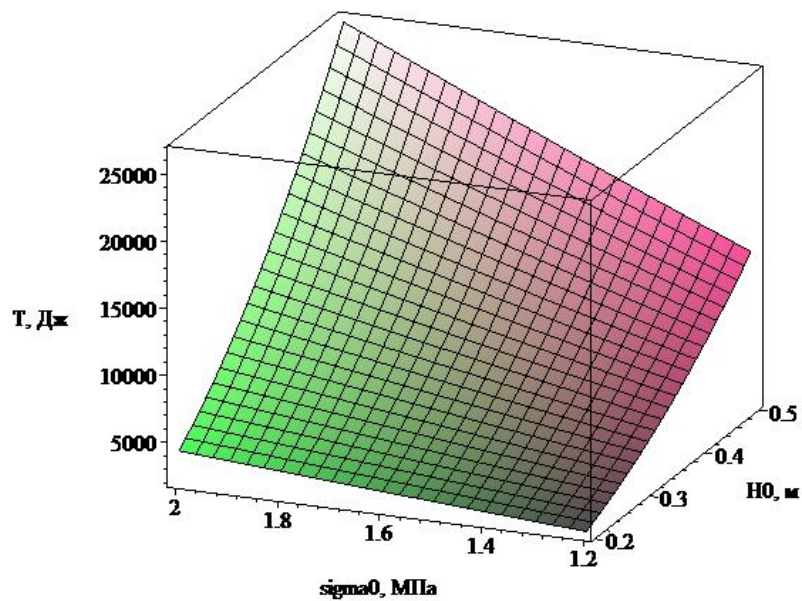


Рис. 3.31. Зависимость энергии удара от толщины уплотняемого слоя грунта и контактных напряжений на поверхности грунта для тяжелых суглинков (при $i = 0,018 \text{ МПа}\cdot\text{с}$)

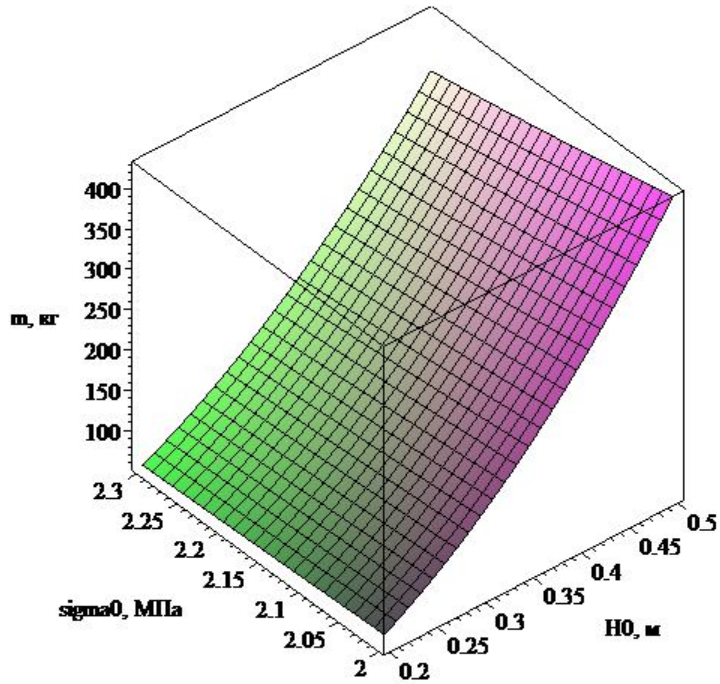


Рис. 3.32. Зависимость массы подвижных частей от толщины уплотняемого слоя грунта и контактных напряжений на поверхности грунта для глин (при $i = 0,026$ МПа·с)

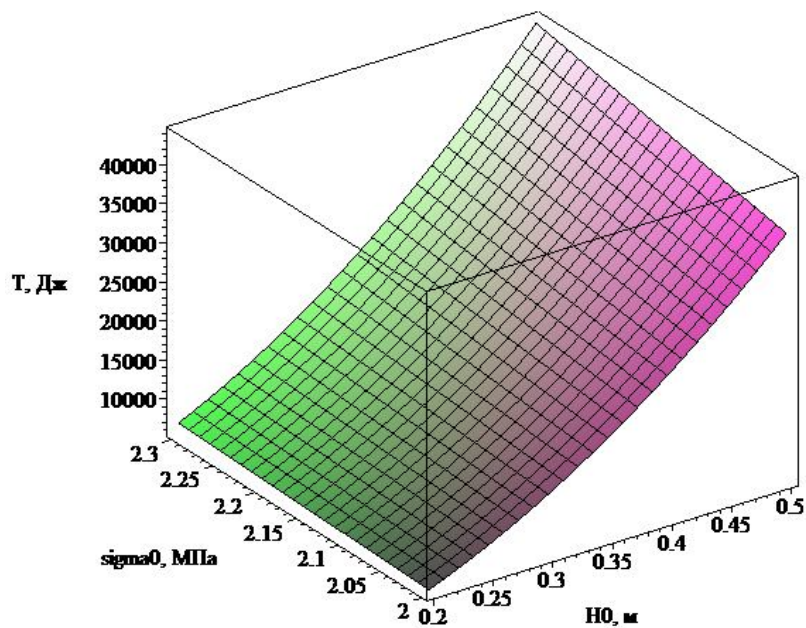


Рис. 3.33. Зависимость энергии удара от толщины уплотняемого слоя грунта и контактных напряжений на поверхности грунта для глин (при $i = 0,026$ МПа·с)

Общая масса гидротрамбовки (а следовательно, и масса подвижных частей) ограничена, и ее максимальное значение составляет

примерно 340...700, 960...1170 и 1510...2200 кг для экскаваторов типа ЭО-2621, ЭО-3322, ЭО-4121 соответственно.

Из расчетной схемы (см. рис. 3.9) видно, что масса гидротрамбовки зависит от таких конструктивных параметров гидроударника, как диаметры корпуса d_K , поршня d_{Π} , штока $d_{шт}$, длин корпуса l_K , штока $l_{шт}$, подвижных частей гидроударника l_{Π} .

Таким образом, в первом приближении общая масса гидротрамбовки определяется по формуле

$$m_{гт} = m_{гy} + m_{пл}, \quad (3.46)$$

где $m_{гт}$ – общая масса гидротрамбовки; $m_{пл}$ – масса сменной трамбующей плиты; $m_{гy}$ – масса гидроударника.

Масса гидроударника определяется по формуле

$$m_{гy} = m_{пгу} + m_K + m_{кр}, \quad (3.47)$$

где $m_{пгу}$ – масса подвижных частей гидроударника; m_K – масса корпуса; $m_{кр}$ – масса переходного кронштейна для крепления к экскаватору, ориентировочно можно принимать

$$m_{кр} = k_{кр} (m_{пгу} + m_K),$$

где $k_{кр} = 0,10...0,15$, но $m_{кр} \geq 50$ кг.

Масса подвижных частей гидротрамбовки равна

$$m = m_{пгу} + m_{пл}. \quad (3.48)$$

Масса корпуса зависит от конструктивных параметров и определяется по формуле

$$m_K = \frac{\pi}{4} [(d_K^2 - d_{\Pi}^2)(l_K - l_1) + (d_K^2 - d_{шт}^2)l_1 + d_{\Pi}^2 \cdot \delta_{дн}] \cdot \rho_M \cdot k_K, \quad (3.49)$$

где d_K – диаметр корпуса, $d_K = d_{\Pi} + 2\delta_{ст}$; $\delta_{дн}$ – толщина днища корпуса; ρ_M – плотность материала корпуса; k_K – коэффициент, учитывающий крепежные элементы и другие детали, $k_K = 1,1$.

Толщина днища, стенки корпуса вычисляется по формулам

$$\delta_{дн} = 0,433d_{\Pi} \sqrt{\frac{p_{max}}{[\sigma]}}, \quad (3.50)$$

$$\delta_{ст} = \frac{p_{max} \cdot d_{п}}{2 \cdot [\sigma]}, \quad (3.51)$$

где p_{max} – максимальное давление в полости гидроударника; $[\sigma]$ – допускаемое напряжение материала корпуса.

Масса подвижных частей гидроударника определяется по формуле

$$m_{пгу} = \frac{\pi}{4} [d_{п}^2 (l_{п} - l_1) + d_{шт}^2 \cdot l_1] \cdot \rho_m. \quad (3.52)$$

Вычисление массы корпуса и подвижных частей гидроударника необходимо также для проведения технико-экономических расчетов, поскольку себестоимость изготовления оценивается по удельным показателям, а за основной параметр принимается масса изделия. В гидротрамбовке наиболее трудоемкими при изготовлении являются корпус и поршни гидроударника. Переходный кронштейн и трамбующая плита сложности в изготовлении не представляют.

На рис. 3.34 показаны полученные зависимости массы корпуса гидроударника от его конструктивных параметров.

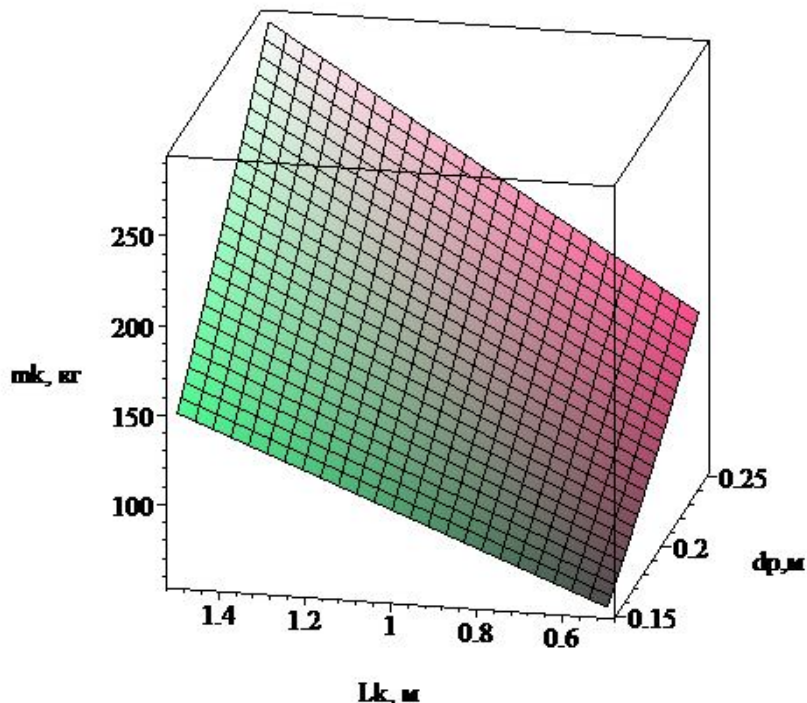


Рис. 3.34 .Зависимость массы корпуса гидроударника от диаметра поршня при различных значениях длины l_k

На рис. 3.35 показаны полученные зависимости массы подвижных частей (бойка) гидроударника от его конструктивных параметров.

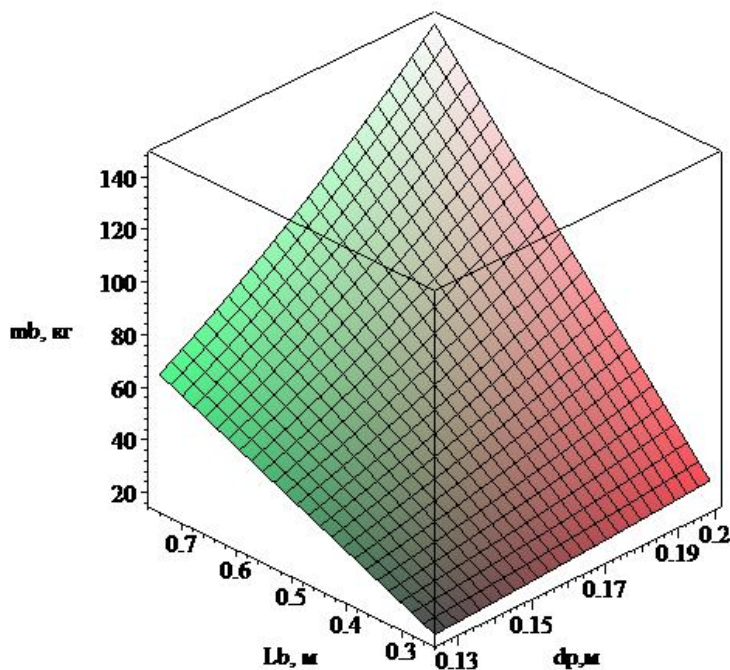


Рис. 3.35. Зависимость массы бойка гидроударника от диаметра поршня при различных значениях длины бойка ($d_{шт} = 0,1$ м)

Приведенные зависимости позволяют определять массу корпуса, бойка гидроударника от его конструктивных параметров.

Из графиков видно, что в первом приближении отношение $m_k / m_{пгу}$ можно принимать равным 0,82...0,90, а отношение $m_{гу} / m_{\epsilon}$ равно 2,0...2,4. Указанными значениями можно пользоваться при проектировании гидротрамбовки.

3.4. Производительность и обоснование технических требований к трамбующему рабочему органу

Техническая производительность уплотнения грунта трамбованием определяется согласно /24/ по формуле

$$\Pi_T = 60SH_0n / n_{п} , \quad (3.53)$$

где Π_T – техническая производительность, м³/ч; n_{Π} – число ударов, необходимое для доведения грунта до требуемой плотности; n – частота ударов в минуту гидротрамбовки.

Эксплуатационная производительность определяется по формуле

$$\Pi_{\text{э}} = \Pi_T \cdot k_B \cdot k_{\text{уп}}, \quad (3.54)$$

где k_B – коэффициент использования базовой машины по времени в течение смены, $k_B = 0,75$; $k_{\text{уп}}$ – коэффициент, учитывающий потери времени на перестановку рабочего оборудования и перемещение базовой машины, $k_{\text{уп}}=0,3\dots0,5$.

Необходимое число ударов n_n по одному следу трамбуемого рабочего органа находится по формуле [81]:

$$n_n = \frac{k_{\Pi} \cdot H \cdot i_p}{i \cdot H_0}, \quad (3.55)$$

где k_{Π} – коэффициент, выбираемый по табл. 3.10 ; H – толщина уплотняемого слоя; H_0 – оптимальная толщина; i и i_p – значения действительного и предельного удельного ударного импульсов.

Таблица 3.10

Значения коэффициента k_{Π}

Требуемая плотность $\frac{\delta}{\delta_{\text{max}}}$	Связный грунт	Несвязный грунт
0,95	4	2
0,98	7	4
1,00	14	10

Из формулы (3.53) видно, что техническую производительность можно повысить за счет увеличения толщины уплотняемого слоя грунта и увеличения частоты ударов.

Повышение толщины уплотняемого слоя грунта, как это следует из формулы (3.37), влечет за собой увеличение геометрических размеров трамбуемой плиты, что (при сохранении одинакового значения удельного ударного импульса и контактного напряжения) приводит к увеличению массы подвижных частей и гидротрамбовки в целом.

Частота ударов гидротрамбовки зависит от конструктивных параметров гидроударника (хода подвижных частей, диаметров поршня, штока и др.), параметров базовой машины.

Что касается числа ударов по одному месту, то, как видно из формулы (3.55), оно является необходимым при рациональных параметрах гидротрамбовки (трамбуемого рабочего органа).

Повышение эксплуатационной производительности гидротрамбовки возможно за счет повышения маневренности базовой машины, которая в значительной степени зависит от квалификации обслуживающего персонала (машиниста).

В итоге можно отметить, что максимальная производительность будет достигнута гидротрамбовкой с рациональными параметрами, т.е. той, которая обеспечивает требуемые удельный ударный импульс и контактные напряжения на поверхности грунта.

Назначение гидротрамбовки в основном определяет ее конструкцию и технические требования, предъявляемые к ней, которые часто противоречивы. Технические требования к таким параметрам гидротрамбовки, как энергия удара, частота ударов, влияют на производительность машины. Энергия удара, частота ударов зависят от параметров обрабатываемой среды и базовой машины. Экономические требования определяются стоимостью изготовления, обслуживания. Надежность и долговечность зависят от надежности деталей, узлов, всей гидротрамбовки в целом. Эргономические требования определяются удобством работы и управления, уровнями вибрации на рабочем месте машиниста, шума.

Основными техническими требованиями, предъявляемыми к гидротрамбовкам, являются следующие:

а) возможность уплотнения различных грунтов на толщину не менее 0,3...0,7 м с коэффициентом уплотнения не ниже 0,95...0,98;

б) возможность уплотнения грунта на откосах;

в) возможность регулирования массы подвижных частей (трамбуемой плиты), скорости, энергии удара в зависимости от толщины уплотняемого слоя и вида грунта;

г) возможность регулирования частоты ударов до 100...160 в мин;

д) должна обеспечиваться возможность регулирования хода подвижных частей до 0,15...0,20 м;

е) конструкция гидротрамбовки должна быть простой, ремонтнопригодной;

ж) гидротрамбовка должна быть универсальной, т.е. обеспечивать уплотнение грунта как при непосредственном ударе трамбующей плиты о грунт, так и через шабот;

з) конструкция гидротрамбовки должна изготавливаться из современных материалов и быть унифицированной по элементам гидропривода с базовой машиной;

и) переходной кронштейн, с помощью которого гидротрамбовка монтируется на базовую машину, должен быть сменным для обеспечения установки гидротрамбовки на экскаваторы различных размерных групп;

к) должно отсутствовать негативное воздействие на базовую машину и оператора;

л) желательна возможность использования гидротрамбовки для других целей, например, для разрушения мерзлого грунта, старых фундаментов и асфальтобетонных покрытий путем замены трамбующей плиты на соответствующий рабочий инструмент.

На рис. 3.36 показаны конструкции гидротрамбовок к экскаваторам типов ЭО-2621 и ЭО-3322, на рис. 3.37 – грунтоуплотняющая машина с гидродарниками на базе трактора.

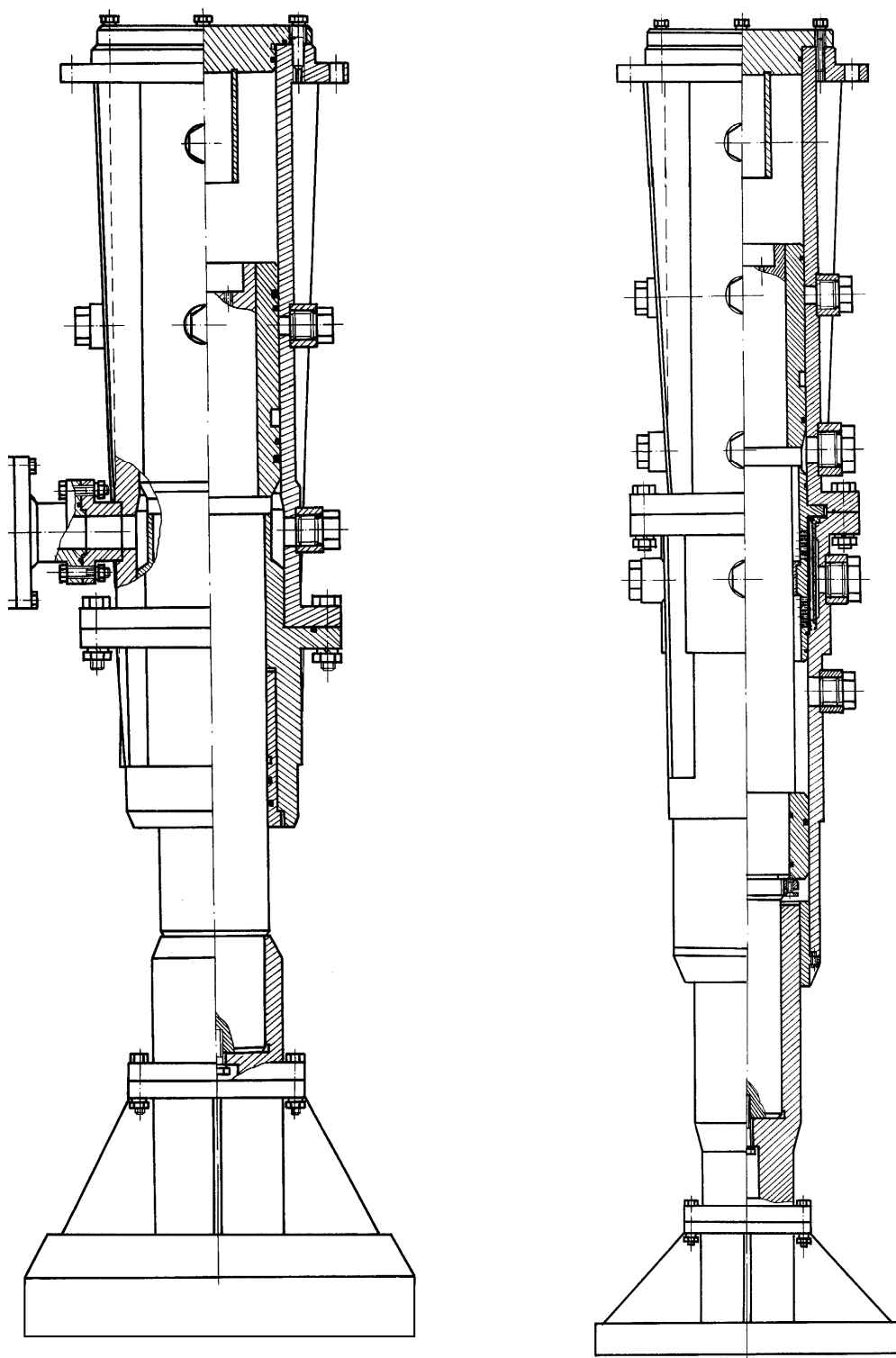


Рис. 3.36. Конструкции гидротрамбовок
к экскаваторам типов ЭО-2621, ЭО-3322 (справа)

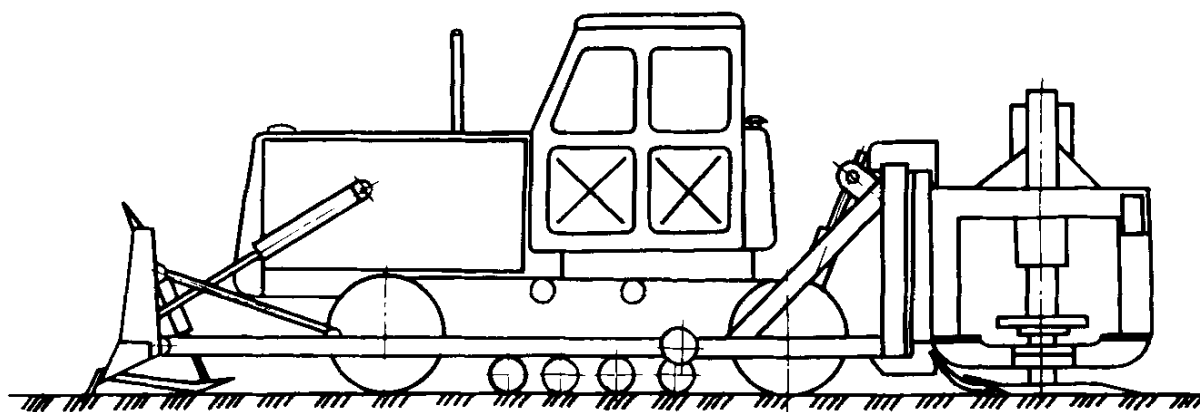


Рис. .37. Грунтоуплотняющая машина с гидроударниками на базе трактора

Предложены аналитические зависимости для определения рациональных параметров трамбуемого рабочего органа (скорости удара, массы подвижных частей, энергии удара) с учетом свойств уплотняемых грунтов на основе уравнений регрессии для коэффициента α и времени удара τ теории удельных импульсов проф. Н.Я.Хархуты, полученных с использованием методов математической теории планирования эксперимента.

Гидроударный трамбуемый рабочий орган должен обеспечивать возможность регулирования скорости удара, массы подвижных частей, энергии удара в зависимости от толщины уплотняемого слоя и вида грунта.

Аналитически установлен диапазон скоростей удара от 1,0 до 5,4 м/с при уплотнении до плотности $\delta = (0,95...0,98)\delta_{\max}$ малосвязных грунтов ($i = 0,005...0,008$ МПа·с, $\sigma_0 = 0,4...0,7$ МПа); для грунтов средней связности диапазон скоростей от 2,5 до 7,3 м/с ($i = 0,010...0,014$ МПа·с, $\sigma_0 = 0,80...1,15$ МПа); для грунтов высокой связности диапазон скоростей от 3,8 до 8,0 м/с ($i = 0,016...0,020$ МПа·с, $\sigma_0 = 1,2...1,5$ МПа).

4. ПРИНЦИПИАЛЬНЫЕ ОСНОВЫ АВТОМАТИЗИРОВАННОГО ПРОЕКТИРОВАНИЯ ГИДРОУДАРНЫХ ИМПУЛЬСНЫХ СИСТЕМ

4.1. Общие сведения о проектировании технических объектов

Проектирование – это творческий процесс создания нового объекта (системы, изделия, материала, процесса), удовлетворяющего заданным требованиям. Цель проектирования состоит в удовлетворении некоторой реально существующей потребности.

Современное проектирование характеризуется возрастанием сложности решаемых задач и широким использованием вычислительной техники /11, 12, 13, 18/.

Проектирование объектов, гидроударных импульсных систем, в частности, представляет процесс, включающий синтез структуры объекта, выбор параметров элементов, исследование математической модели, анализ результатов и принятие решения.

Этапы процесса проектирования показаны на рис. 4.1. Из рисунка видно, что проектирование начинается с разработки технического задания (ТЗ), тщательного анализа возможных решений. Затем создается математическая модель разрабатываемого объекта (изделия, процесса). Построив математическую модель, приступают к ее исследованию, изучению ее свойств, стремясь выяснить, в какой мере разработанный объект соответствует своему назначению.

В целом для процесса проектирования характерна итерационная цикличность, причем на некоторых этапах приходится выполнять большие объемы самых разнообразных вычислений.

Создание любого объекта включает следующие стадии: техническое задание, техническое предложение, эскизный проект, технический проект, разработку рабочей документации.

Исходной информацией для проектирования служит техническое задание (ТЗ), где приведены основные требования к проектируемому объекту.

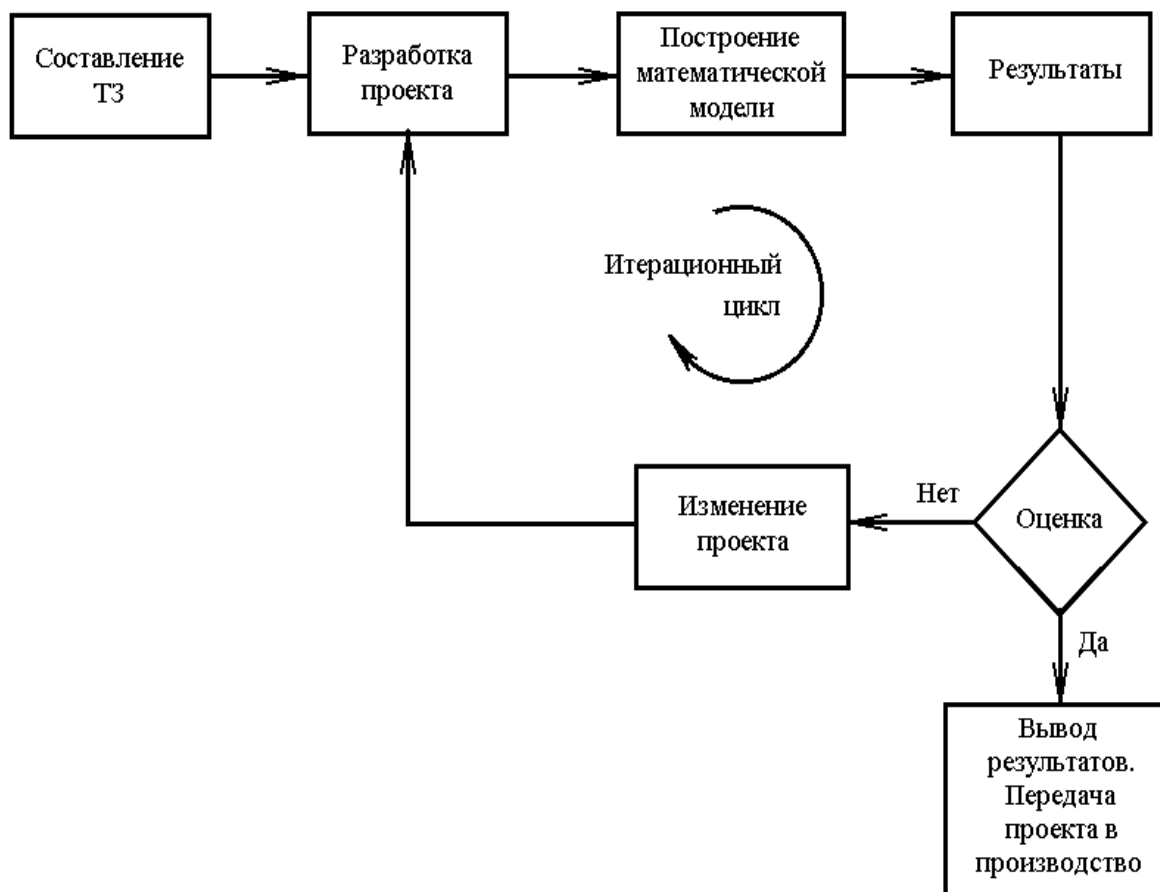


Рис.4.1. Процесс проектирования

Идея итерационного метода, т.е. метода последовательных приближений поиска точного или оптимального решения, или, наконец, наиболее рационального решения, когда нет достаточно четких критериев оценки результатов, не является новой при выполнении обычных проектных и конструкторских работ.

Проектант-разработчик, получив ТЗ, на основании своего опыта, известных ему аналогов и интуиции намечает первоначальный приближенный вид решения – принципиальную схему, некоторые конструктивные формы, взаимодействие элементов и т.д.

Затем с помощью расчетных методов, различных критериев оценки он анализирует полученное решение и вносит определенные изменения в первоначальный вариант. Далее весь цикл анализа и корректировки решения повторяется.

При обычном методе проектирования разработчик, затрачивая много времени, стремится одним, максимум двумя исправлениями получить желаемый, наиболее подходящий результат.

В автоматизированном проектировании применяется тот же итерационный метод. Но реализация метода существенно отличается от обычного.

Машинная итерация характеризуется быстродействием. Благодаря быстродействию можно осуществить большое число итераций, проработать множество различных вариантов и получить при этом высокую степень оптимизации.

Машинная итерация позволяет использовать расчетные и оценочные программы, применять специальные, хорошо разработанные методы оптимизации.

Принципиальное отличие процесса итераций при обычном и машинном проектировании состоит в том, что в обычном методе проектант-разработчик стремится к минимальному числу итераций, пытаясь за один проход решить все вопросы, при машинной итерации разработчик стремится решить задачу путем последовательных приближений за счет многократного повторения циклов.

Основой автоматизированных систем проектирования (САПР) становятся математические методы. При этом роль человека-проектанта-разработчика не принижается, а повышается, так как постановка задач и принятие окончательных решений остаются за человеком.

В настоящее время реальный подход к проектированию объектов заключается в наиболее полном сочетании возможностей вычислительной техники по переработке больших объемов информации и умении проектанта-разработчика оценивать ситуацию на основе качественных требований и суждений и выполнять функции, требующие воображения, интуиции и способности учитывать различные факторы, не предусмотренные первоначальной программой.

Следовательно, проблема автоматизации проектирования становится проблемой создания некоего синтеза разума человека и вычислительной системы – эргатического интеллекта.

С появлением эргатического интеллекта возникает необходимость в разработке теоретического, математического, программного обеспечения процесса проектирования.

При решении задач проектирования требуется не только осуществление автоматизации, но и выбор оптимального решения.

Проектирование гидроударной импульсной системы представляет собой итерационный процесс, связанный с последовательным

улучшением системы, принятием уточняющих конструктивных решений. Каждый цикл включает в себя анализ эффективности объекта проектирования, влияния на него характеристик элементов гидроударной импульсной системы и ограничений.

4.2. Особенности проектирования гидроударных импульсных систем

Основная цель проектирования гидроимпульсной системы заключается в выборе оптимального варианта структуры системы, обладающей заданными свойствами, и определении параметров гидроударной импульсной системы для генерирования ударных импульсов заданной энергии единичного удара и частоты при разработке грунта в определенных условиях при высоком КПД использования установочной мощности привода, при ограниченных размерах и массе ударного устройства для выбранной базовой машины.

Вышеперечисленные условия должны обеспечиваться автоматическим отключением гидроударного устройства при отсутствии преграды со стороны разрабатываемой среды.

Функционирование гидроимпульсных органов машин носит системный характер. Однако существующие методы расчета не учитывают этого (например, взаимодействия активного рабочего органа с разрабатываемой средой).

Рассмотрение гидроимпульсных органов машин как сложных систем, состоящих из взаимодействующих элементов, построение математической модели для них и исследование ее свойств методом моделирования составляют сущность системного подхода.

Наиболее важной концепцией системного подхода является четкое представление о том, что система не должна рассматриваться как простая сумма своих элементов, поэтому проектирование и исследование гидроимпульсных рабочих органов машин должны базироваться на системной модели, отражающей их структуру, связи и параметры.

В этом случае вычислительный эксперимент на математической модели (имитационное моделирование) оказывается единственным возможным способом решения проблемы проектирования гидроударных импульсных систем.

На стадии проектирования гидроударных импульсных систем имитационное моделирование позволяет рассмотреть достаточно большое количество вариантов и выбрать наиболее приемлемый из них.

При создании гидроударных импульсных систем необходимо рассматривать большое число вариантов структур, параметров и изменять, уточнять математическую модель.

Многовариантность и многомодельность вычислительного эксперимента проявляются в многократных изменениях программы, реализующей вычислительный алгоритм.

В этой связи внедрение новых принципов автоматизации проектирования гидроимпульсных рабочих органов ДСМ различного назначения базируется на системном анализе функционирования, применении унифицированных модулей (блоков), их формализации и моделировании с помощью ЭВМ.

При этом универсальная имитационная модель гидроимпульсных рабочих органов оформлена в виде программно-имитационного комплекса.

Особенность гидроударной импульсной системы заключается в том, что основная часть функциональных элементов представляет собой динамическую систему с изменяющимися во времени параметрами.

Сложность и многообразие процессов функционирования гидроударных импульсных систем машин ударного действия не позволяют строить для них абсолютно адекватные математические модели. Математическое моделирование является результатом формализации математического описания с необходимой степенью приближения к действительности. Процесс функционирования гидроударной импульсной системы рассматривается как последовательная смена ее состояний в некотором интервале времени.

Поскольку процесс функционирования гидроударной импульсной системы сложен и затруднено ее полное математическое описание в общем виде, то наиболее эффективным и универсальным методом исследования гидроударной импульсной системы является имитационное моделирование.

Общую структуру процесса проектирования гидроударной импульсной системы в САПР можно представить в виде алгоритма, в котором чередуются поисковые, расчетные и иные процедуры, вы-

полняемые ЭВМ, и творческие процедуры, связанные с принятием решений о приемлимости полученных результатов или об изменении направлений поиска, выполняемые проектантом-разработчиком.

Для реализации такой концепции проектирования необходима декомпозиция общей задачи проектирования гидроударной импульсной системы на ряд последовательно решаемых подзадач меньшей размерности.

Алгоритм проектирования делит проектирование на структурное и параметрическое.

Под структурным проектированием понимается выбор структуры, конфигурации, облика гидроударной импульсной системы, что в настоящее время наиболее эффективно выполняет человек-проектант, основываясь на своем опыте, традициях и т.д. Это так называемые неформализованные задачи проектирования.

Под параметрическим проектированием понимается расчет оптимальных значений проектных параметров гидроударной импульсной системы. Это так называемые формализованные задачи проектирования.

При автоматизированном проектировании такое деление необходимо, чтобы с наибольшим эффектом использовать каждую составляющую эргатической системы.

Разделить проектирование гидроимпульсной системы на структурное и параметрическое заставляет еще и то, что первое является по сути своей многокритериальным. Тогда как второе – однокритериально.

К структурным характеристикам гидроударной импульсной системы можно отнести следующие:

- количество полостей гидроударного устройства (взводящей, сливной, пневмоаккумуляторной, управляющей и т.д.);
- расположение полостей гидроударного устройства;
- способ вытеснения рабочей жидкости при рабочем ходе поршня-бойка;
- способ нанесения удара инструмента по обрабатываемому грунту (с непосредственным ударом, через шабот, с опорным кронштейном, комбинированный и т.д.);
- тип блока управления рабочим циклом гидроударного устройства (золотниковый, беззолотниковый с МЗРЭ, клапанный и т.д.);

- форма и расположение блока управления рабочим циклом гидроударного устройства (внутри корпуса, снаружи и т.д.);
- количество энергоносителей (один – рабочая жидкость, два – газ и рабочая жидкость).

К возможным целевым функциям, по которым оценивается каждая структурная характеристика (именно оценивается, не оптимизируется – просто рассматриваются альтернативные варианты), относятся: С – стоимость, Н – надежность (вероятность безотказной работы за заданное время), Р – ремонтпригодность, N – назначение и т.д.

Для оценки каждой структурной характеристики используют частные критерии, что приводит к многокритериальным задачам структурного проектирования гидроударных импульсных систем.

Проектант-разработчик, выполняя структурное проектирование, применяет интуитивные или эвристические критерии, существующие в данной области знаний.

Если у проектанта-разработчика имеется определенный опыт, то альтернативные варианты не создают, а сразу проектируют один вариант, который в дальнейшем подвергают параметрической оптимизации (параметрическое проектирование).

Оценку результатов такого структурно-альтернативного проектирования правильнее производить по нескольким критериям, чтобы всесторонне охарактеризовать структурное совершенство гидроударной импульсной системы.

При параметрическом проектировании гидроударной импульсной системы проектант-разработчик задает параметры, которые необходимо оптимизировать, целевую функцию (критерий), дисциплинирующие условия, метод оптимизации, составляет программы оптимизации (или использует уже существующие), определяет исходные данные.

Алгоритм расчета гидравлического ударного устройства представлен на рис. 4.2. Рабочее окно определения основных параметров гидроударного устройства приведено на рис. 4.3.

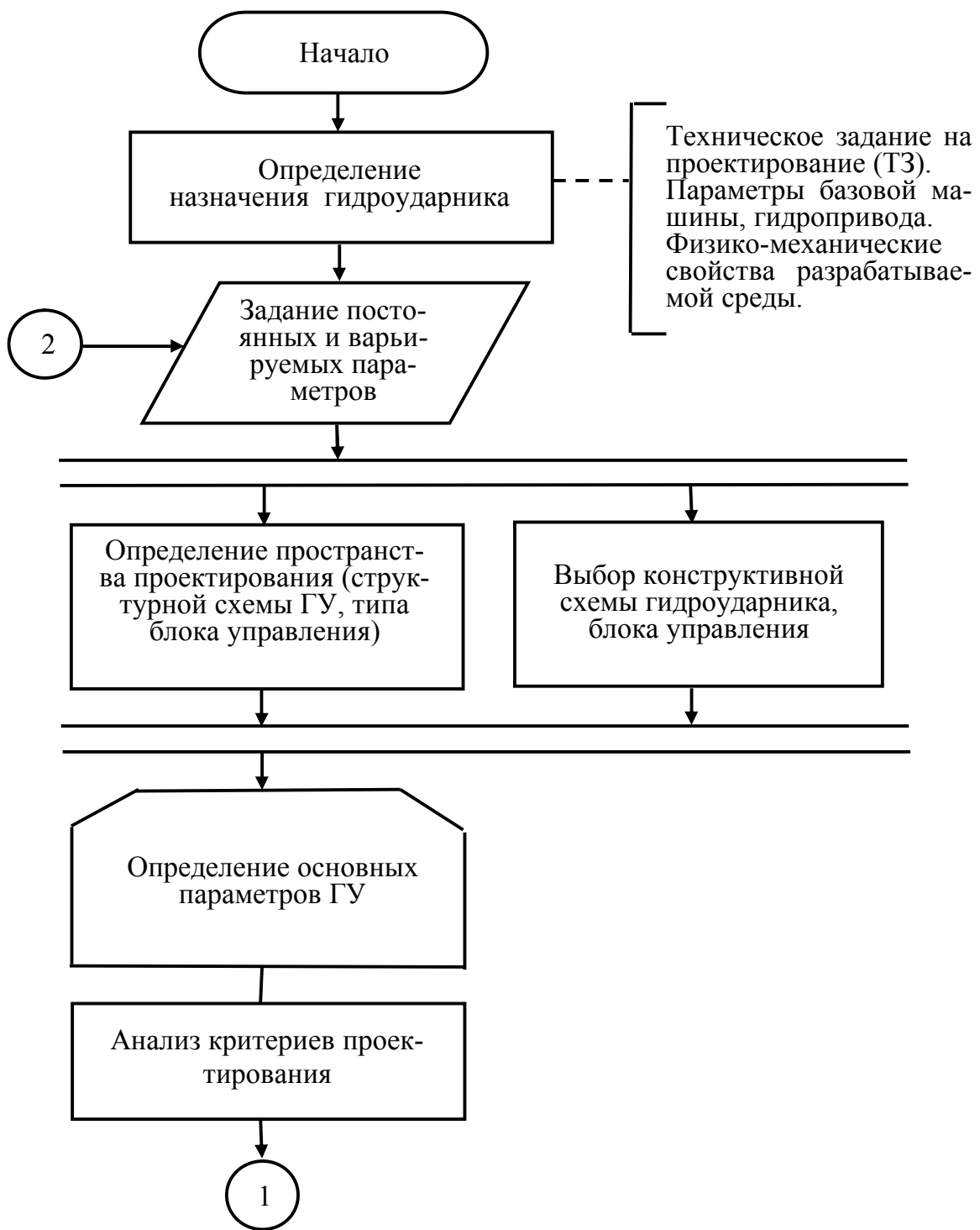


Рис. 4.2. Алгоритм расчета гидроударного устройства (начало)

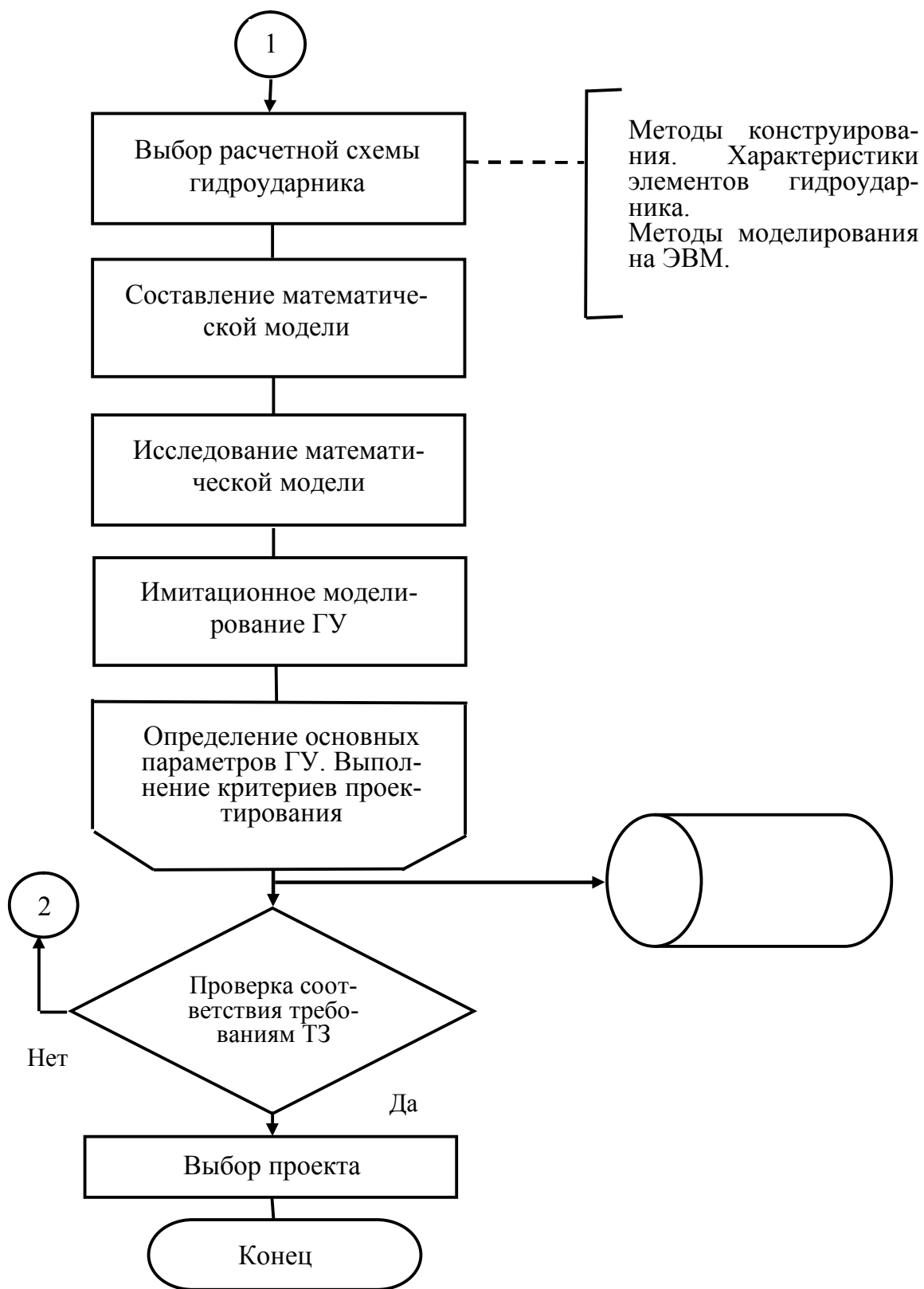


Рис. 4.2. Алгоритм расчета гидроударного устройства (окончание)

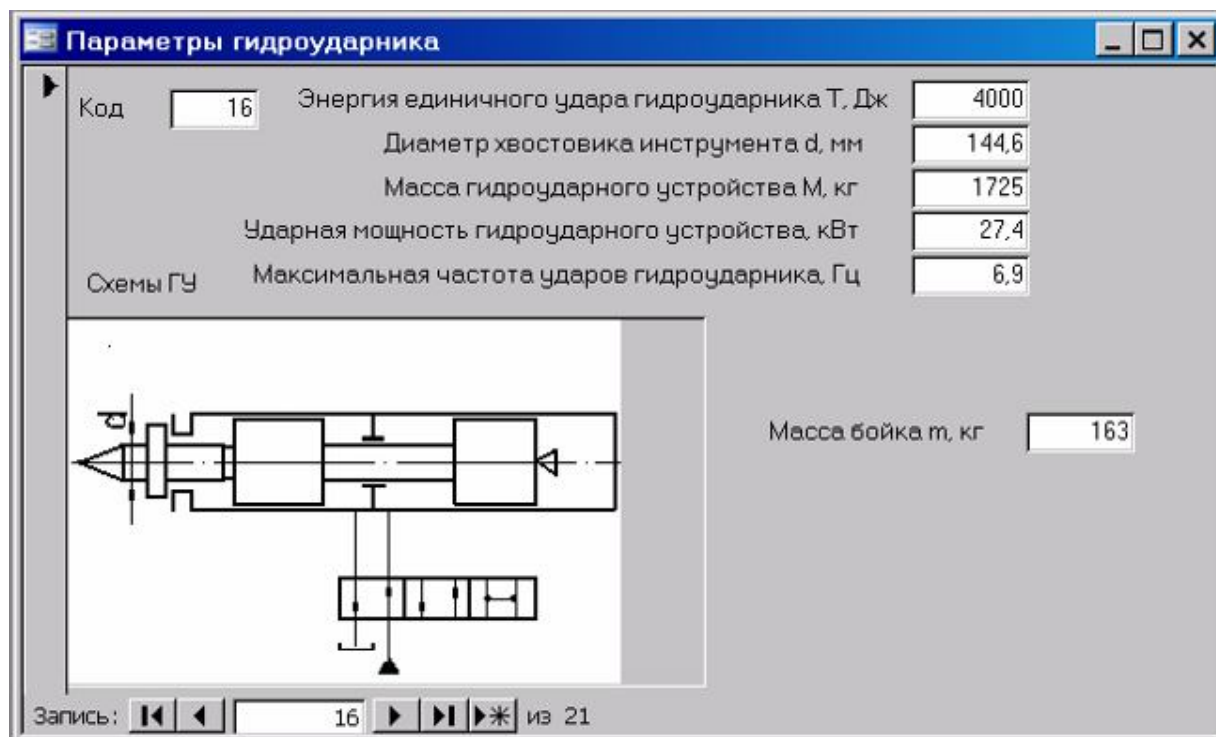


Рис. 4.3. Рабочее окно определения основных параметров гидроударного устройства (энергия единичного удара 4000 Дж)

Гидроударная импульсная система имеет многоуровневую структуру.

Гидроударная импульсная система в общем случае как сложное устройство разделяется первоначально на несколько крупных составных частей по функциональным и конструктивным признакам /26/:

- источник энергии (насосная станция);
- генератор импульсов (гидроударное устройство) – для преобразования подводимой энергии потока жидкости в механическую энергию импульсов высокой мощности;
- объект воздействия – обрабатываемая среда;
- опорное устройство (базовая машина) – для обеспечения возможности передачи энергии импульсов от генератора к объекту воздействия.

Если структура гидроударной импульсной системы определена, то ее выходные параметры зависят только от параметров элементов и параметров внешних условий.

Алгоритм расчета трамбующего рабочего органа представлен на рис. 4.4.

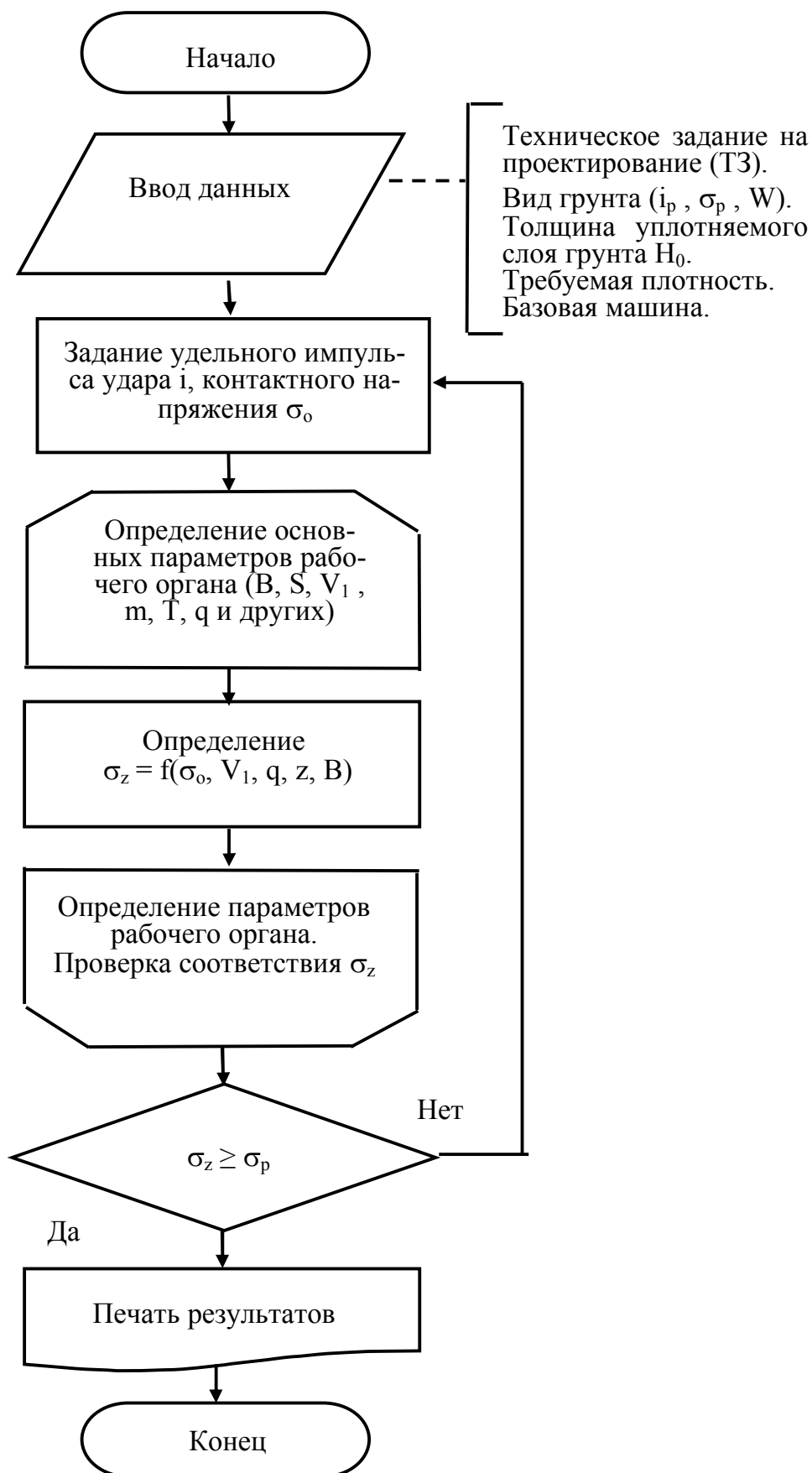


Рис. 4.4. Алгоритм расчета трамбуемого рабочего органа

Оптимизация является необходимым этапом на всех уровнях проектирования объекта. При этом в зависимости от уровня проектирования возможен различный подход как к выбору критерия оптимальности, так и к использованию методов оптимизации /18/.

Оптимальное проектирование основано на использовании численных методов поиска экстремумов функций, отображающих различные свойства объектов проектирования, т.е. на методах теории оптимизации /18/.

Под оптимальным понимают проектирование, цель которого состоит в создании технического объекта с таким набором (вектором) его проектных параметров и выполняющего не только заданные функции, но и отвечающего некоторым заранее установленным показателям качества, называемого критерием оптимизации, или целевой функцией.

Одна из центральных задач – выбор критерия оптимизации. При проектировании гидроударной импульсной системы цели оптимизации могут состоять в обеспечении максимального КПД; максимальной надежности (минимальной вероятности отказа); минимальной стоимости изготовления; минимальной энергоемкости разработки грунта; максимальной энергии единичного удара, ударной мощности; максимальной производительности; максимальной массы поршня-бойка и др.

Каждой из перечисленных целей оптимального проектирования соответствует свой критерий оптимизации: КПД, надежность и др. Обилие критериев усложняет как задачу выбора наилучшего критерия, так и формализацию задачи проектирования. В большинстве случаев названные критерии представляются функциями, не имеющими экстремумов (нетривиальными).

Проектирование объектов, гидроударных импульсных систем в частности, представляет процесс, включающий синтез структуры объекта, выбор параметров элементов, исследование математической модели, анализ результатов и принятие решения.

Библиографический список

1. Адлер Ю.П. Планирование эксперимента при поиске оптимальных условий / Ю.П. Адлер, Е.В. Маркова, Ю.В. Грановский. – М.: Наука, 1976. – 279 с.
2. Алимов О.Д. Гидравлические виброударные системы / О.Д.Алимов, С.А.Басов. – М.: Наука, 1990. – 352 с.
3. Архипенко А.П. Гидравлические ударные машины / А.П.Архипенко, А.И.Федулов. – Новосибирск: ИГД СО АН СССР, 1991. – 108 с.
4. Баловнев В.И. Дорожно-строительные машины с рабочими органами интенсифицирующего действия. – М.: Машиностроение, 1981. – 223 с.
5. Баловнев В.И. Интенсификация земляных работ в дорожном строительстве / В.И.Баловнев, Л.А.Хмара. – М.: Транспорт, 1983. – 183 с.
6. Галдин В.Н. Основы автоматизированного проектирования гидроударных импульсных систем / В.Н. Галдин, Н.С. Галдин // Вестник Сибирской государственной автомобильно-дорожной академии. – Омск: СибАДИ, 2009. – Вып. 4 (14). – С. 48 – 51.
7. Галдин Н.С. Многоцелевые гидроударные рабочие органы дорожно-строительных машин: монография / Н.С. Галдин. – Омск: Изд-во СибАДИ, 2005. – 223 с.
8. Галдин Н.С. Уравнения регрессии основных параметров гидроударных импульсных систем // Строительные и дорожные машины. – 2002. – № 3. – С.15 – 16.
9. Галдин Н.С., Бедрина Е.А. Ковши активного действия для экскаваторов: Учеб. пособие. – Омск: Изд-во СибАДИ, 2003. – 52 с.
10. Гидропневмоударные системы исполнительных органов горных и строительно-дорожных машин / А.С.Сагинов, А.Ф.Кичигин, А.Г.Лазуткин, И.А.Янцен. – М.: Машиностроение, 1980. – 200 с.
11. Дьяконов В.П. Справочник по применению системы EUREKA. – М.: Физматлит, 1993. – 96 с.
12. Дьяконов В.П. Maple 9.5/10 в математике, физике и образовании. / В.П. Дьяконов. – М.: Солон-пресс, 2006. – 719с.
13. Керимов З.Г. Автоматизированное проектирование конструкций / З.Г. Керимов, С.А. Багиров. – М.: Машиностроение, 1985. – 224 с.
14. Красников Н.Д. Динамические свойства грунтов и методы их определения / Н.Д. Красников. – Л.: Стройиздат, 1970. – 239 с.
15. Машины для уплотнения грунтов и дорожно-строительных материалов / С.А.Варганов, Г.С.Андреев, В.Я.Балакирев и др. – М.: Машиностроение, 1981. – 240 с.
16. Мельников С.В. Планирование эксперимента в исследованиях сельскохозяйственных процессов / С.В. Мельников, В.Р. Алешкин, П.М. Рошин. – Л.: Колос, 1980. – 168 с.
17. Михайлов В.И. Планирование экспериментов в судостроении / В.И. Михайлов, К.М. Федосов. – Л.: Судостроение, 1978. – 160 с.

18. Норенков И.П. Основы автоматизированного проектирования: учеб. для вузов / И.П. Норенков. – М. : Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2002. – 336 с.
19. Тарасов В.Н. Теория удара в строительстве и машиностроении / В.Н. Тарасов, И.В. Бояркина, М.В. Коваленко, С.В.Кузнецов, И.Ф. Шлегель. – М.: Изд-во АСВ, 2006. – 336 с.
20. Тарасов В.Н., Галдин Н.С. Расчет параметров трамбуемых рабочих органов // Строительные и дорожные машины. – 2003. – № 3. – С. 34 – 36.
21. Теоретические основы создания гидроимпульсных систем ударных органов машин / А.С.Сагинов, И.А.Янцен, Д.Н.Ешуткин, Г.Г.Певень. – Алма-Ата: Наука, 1985. – 256 с.
22. Федоров Д.И. Экскаваторные ковши активного действия / Д.И.Федоров, И.А.Недорезов, В.Г.Тайц, А.И.Федулов. – М.: Транспорт, 1974. – 224 с.
23. Федулов А.И. Ударное уплотнение грунтов /А.И.Федулов, Р.А.Иванов, В.В.Пучков. – Новосибирск: ИГД СО АН СССР, 1983. – 118 с.
24. Хархута Н.Я. Машины для уплотнения грунтов. Теория, расчет и конструкции. – 2-е изд., перераб. – М.: Машиностроение, 1973. – 176 с.
25. Цытович Н.А. Механика грунтов / Н.А. Цытович . – М.: Высш. школа, 1979. – 272 с.
26. Щербаков В.С. Моделирование гидравлических импульсных систем / В.С. Щербаков, В.Н. Галдин // Вестник Воронежского государственного технического университета. – Воронеж: ВГТУ, 2010. – Том 6, № 5. – С. 121 – 124.
27. Янцен И.А. Основы теории и конструирования гидропневмоударников / И.А. Янцен, Д.Н. Ешуткин, В.В. Бородин. – Кемерово: Кемеровское книжное изд-во, 1977. – 246 с.
28. Вибротрамбовки гидравлические для экскаваторов [Электронный ресурс]. URL: <http://gidromolot.tradicia-k.ru/categories/index.php?id=200&yclid=2998240619207592903> (дата обращения 01.02.2016).
29. Гидромолоты — справочная информация [Электронный ресурс]. URL: <http://gidromolot.tradicia-k.ru/categories/index.php?id=155> (дата обращения 01.09.2010).
30. Гидромолоты Delta [Электронный ресурс]. URL: <http://www.mirdelta.ru/categories/index.php?id=1> (дата обращения 01.09.2010).
31. URL: <http://mash-xxl.info/info/700271/>.
32. URL: <http://m.fb.ru/article/111983/trambovochnaya-mashina>.
33. URL: <http://www.russian-car.ru/stehr-sbv-360-4wd.htm>.
34. URL: <http://omsk.regmarkets.ru/mashiny-i-oborudovanie-dlya-uplotneniya-gruntov-15669/67235-trambuyushchaya-mashina-sr75-h/>.
35. URL: <http://www.studfiles.ru/preview/1845990/page:2/>.
36. URL: http://nazidati.ru/oboryd/oboryd_1_31.html.

СОДЕРЖАНИЕ

Введение	3
1. Гидроударные рабочие органы дорожно-строительных машин	4
1.1. Активные рабочие органы дорожно-строительных машин, области применения гидроударных устройств	4
1.2. Классификация, структура гидроударных устройств.....	8
1.3. Особенности беззолотниковых гидроударных устройств.....	10
1.4. Основные параметры гидроударных устройств.....	13
1.5. Основы расчета гидроударных устройств.....	14
1.6. Уравнения регрессии основных параметров гидроударных устройств	18
2. Рабочие органы ударного действия для уплотнения грунта трамбованием	24
2.1. Особенности уплотнения грунта трамбованием	24
2.2. Анализ конструкций машин для уплотнения грунта трамбованием.....	37
3. Обоснование параметров рабочего органа ударного действия при уплотнении грунта	45
3.1. Теоретическое определение основных закономерностей ударного уплотнения грунтов.....	45
3.2. Вывод уравнений регрессии для параметров взаимодействия трамбующего рабочего органа с грунтом.....	56
3.3. Обоснование, выбор расчетной схемы и основных параметров трамбующего рабочего органа.....	61
3.4. Производительность и обоснование технических требований к трамбующему рабочему органу.....	81
4. Принципиальные основы автоматизированного проектирования гидроударных импульсных систем	87
4.1. Общие сведения о проектировании технических объектов.....	87
4.2. Особенности проектирования гидроударных импульсных систем.....	90
Библиографический список.....	99

Научное издание

Николай Семенович Галдин

РАБОЧЕЕ ОБОРУДОВАНИЕ УДАРНОГО ДЕЙСТВИЯ
ДЛЯ УПЛОТНЕНИЯ ГРУНТА ТРАМБОВАНИЕМ
Монография

Редактор И. Г. Кузнецова

Техническая подготовка мультимедийного издания – Т.И. Кукина

* * *

Подписано к печати
Формат 60x90 1/16. Бумага писчая
Гарнитура Таймс
Оперативный способ печати
Усл. п.л. 6, 5
Печатается в авторской редакции

* * *

Издательский центр КАН
644122, г. Омск, ул. Красный Путь, 30