

ГОСУДАРСТВЕННОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ  
ВЫСШЕГО ПРОФЕССИОНАЛЬНОГО ОБРАЗОВАНИЯ  
«БЕЛОРУССКО-РОССИЙСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»

УДК 621.828.6

**ДЖАЛИЛВАНД**  
**Эхсан Хоррам**

**ПАРАМЕТРЫ ЗАГЛУБЛЕНИЯ ОТВАЛА  
ПРИ РАЗНЫХ РЕЖИМАХ РАБОТЫ БУЛЬДОЗЕРА**

**Автореферат**  
диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

по специальности 05.05.04 - дорожные, строительные  
и подъемно-транспортные машины

Могилев 2015



Научная работа выполнена в государственном учреждении высшего профессионального образования «Белорусско-Российский университет»

Научный руководитель **Берестов Евгений Иванович**, доктор технических наук, профессор, профессор кафедры «Строительные, дорожные, подъемно-транспортные машины и оборудование», ГУ ВПО «Белорусско-Российский университет»

Официальные оппоненты: **Добышев Анатолий Семенович**, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Механизация животноводства и электрификация сельскохозяйственного производства», УО «Белорусская Государственная сельскохозяйственная академия»

**Смоляк Анна Николаевна**, кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры «Строительные и дорожные машины», Белорусский национальный технический университет

Оппонирующая организация **УО «Белорусский государственный университет транспорта»**

Защита состоится 27 ноября в 14-00 на заседании совета по защите диссертаций Д 02.05.12 при Белорусском национальном техническом университете по адресу: 220013, г. Минск, пр-т Независимости, 65, гл. корп., ауд. 202, E-mail: [www.smolyak.anna@mail.ru](mailto:www.smolyak.anna@mail.ru), телефон ученого секретаря (+375-29) 279-32-52.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Белорусского национального технического университета.

Автореферат разослан 16 октября 2015 г.

Ученый секретарь совета  
по защите диссертаций



А.Н.Смоляк



## ВВЕДЕНИЕ

Рабочий процесс землеройно-транспортных машин требует значительных усилий как при заглаблении отвала, так и при копании грунта. Копание сопровождается частыми изменениями толщины стружки и самопроизвольным изменением положения рабочего органа по высоте относительно поверхности разрабатываемого грунта. Вследствие этого исследование процесса заглабления отвала является актуальной задачей. И хотя эта проблема очевидна, в технической литературе данному вопросу уделено недостаточно внимания. Существующие методы расчета не охватывают все случаи, возникающие при заглаблении отвала бульдозера в грунт, без чего невозможно всесторонне проанализировать этот процесс.

Требуется совершенствование и конструкция отвала, поскольку металл ножей используется неэффективно: при замене ножей требуются новые крепежные болты из-за повреждения резьбы грунтом.

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

### **Связь работы с крупными научными программами (проектами) и темами**

Работа выполнялась по госбюджетной теме ГБ-0602 (номер госрегистрации 2006563) «Методы проектирования, модернизации и эксплуатации строительных, дорожных, подъемно-транспортных машин с целью улучшения их характеристик» и госбюджетной теме ГБ-1103 (номер госрегистрации 20111328) «Строительные, дорожные, подъемно-транспортные машины и оборудование: проектирование, диагностирование и эксплуатация».

### **Цель и задачи исследования**

Целью является разработка методов расчета и обоснование параметров, способствующих интенсификации заглабления рабочего органа бульдозера в грунт.

Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие задачи:

- разработать методы, обеспечивающие расчет параметров, характеризующих заглабление рабочего органа бульдозера в грунт;
- исследовать влияние режима заглабления отвала и условий заглабления на величину возникающих сопротивлений;
- дать рекомендации по использованию полученных результатов при проектировании рабочего оборудования бульдозера.

### **Научная новизна**

Разработаны аналитические уравнения, обеспечивающие расчет предельных давлений при заглаблении отвала, учитывающие возможные сочетания нормальных и наклонных давлений на удерживающей поверхности грунта и разрушаю-



щей поверхности под площадкой износа ножа, и методы расчета этих давлений, учитывающие условия заглубления отвала при разных режимах работы.

Разработан метод расчета заглубления отвала при непредельных давлениях на грунт, позволяющий рассчитать угол наклона траектории его заглубления с учетом величины площадки износа на ножах бульдозера и давлений, действующих на нее.

Разработан метод расчета давлений, действующих на площадку износа ножа при копании без изменения толщины стружки и приводящих к интенсивному износу нижней стороны ножа.

Обоснованы рекомендации по выбору угла наклона траектории заглубления отвала, а также по изменению конструкции отвала, позволяющие повысить эффективность работы бульдозера.

### **Положения, выносимые на защиту**

На защиту выносятся научные результаты проведенных исследований:

- разработанные на основе теории предельного равновесия грунтовых масс аналитические уравнения и методы расчета предельных давлений, необходимых для заглубления отвала при разных режимах работы, позволяющие оценить влияние на этот процесс конструктивных параметров отвала и параметров заглубления с целью их оптимизации;

- разработанный на основе положений механики грунтов метод расчета заглубления отвала при непредельных давлениях на грунт, позволяющий рассчитать заглубление отвала с учетом величины площадки износа и давлений, действующих на нее;

- разработанный метод расчета давлений, действующих на площадку износа при копании без изменения толщины стружки, позволяющий выявить причины интенсивного износа нижней стороны ножа;

- результаты исследований влияния конструктивных параметров отвала и условий его заглубления, позволившие установить взаимосвязь между их значениями и физическими процессами, происходящими при разрушении грунта ножами при заглублении отвала бульдозера, и выработать рекомендации по их выбору, позволяющие повысить эффективность работы бульдозера.

### **Личный вклад соискателя**

Автор самостоятельно получил основные результаты: разработаны аналитические уравнения и методы, обеспечивающие расчет предельных давлений, необходимых для заглубления отвала; метод расчета заглубления отвала при непредельных давлениях на грунт; метод расчета давлений на площадку износа при копании; проведены исследования влияния конструктивных параметров отвала и условий заглубления на процесс заглубления отвала. Совместно с научным руководителем и соавторами участвовал в составлении планов статей и докладов и написании их, подаче идей для заявок на полезные модели и изобретения. Общая



концепция исследований разработана совместно с научным руководителем докт. техн. наук, проф. Берестовым Е.И.

### **Апробация результатов диссертации**

Результаты диссертационной работы докладывались на международной научно-технической конференции: «Интерстроймех – 2011» (Могилев 2011), обсуждались на заседаниях кафедры «Строительные, дорожные, подъемно-транспортные машины и оборудование» Белорусско-Российского университета в 2010, 2011, 2012, 2014 и 2015 г.г., на технических семинарах фирмы «Нерсо» (Исламская Республика Иран) в 2010 и 2011 г.г., на научно-техническом семинаре кафедры «Строительные и дорожные машины» Белорусского национального технического университета в 2014 г.

Результаты работы используются в учебном процессе на кафедре СДПТМиО Белорусско-Российского университета и приняты для использования фирмой Vulkan Alborz co.Ltd (Исламская Республика Иран).

### **Опубликованность результатов диссертации**

По теме диссертации опубликовано 9 печатных работ: одна глава в монографии, три статьи в журналах из перечня изданий ВАК Беларуси, статья в центральном журнале Российской Федерации из перечня изданий ВАК РФ, статья и тезисы доклада в материалах конференции. Получено 2 патента Республики Беларусь на полезную модель и положительное решение на изобретение.

### **Структура и объем диссертации**

Диссертационная работа состоит из введения, общей характеристики работы, четырех глав, заключения, библиографического списка и приложений. Общий объем диссертации – 106 листов машинописного текста (без приложений). Работа содержит перечень условных обозначений (3 л.), 57 рисунков, 5 таблиц и приложения. Библиографический список содержит 82 наименования, включая и авторские работы (9 наименований).

## **ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ**

**В первой главе** представлен обзор и анализ работ, посвященных копанию грунта бульдозером, на основании которых выбрано направление исследований.

Бульдозерами ежегодно выполняется большой объем работ, которые отличаются высокой энергоемкостью. Поэтому расчету сопротивлений копанию уделялось основное внимание. В большинстве методов расчета сопротивление копанию определяется как сумма трех сил: сопротивления резанию, сопротивления призмы волочения и сопротивления перемещения грунта по отвалу. Вертикальная составляющая сопротивления копанию  $P_2$  обычно находится по формуле

$$P_2 = aP_1,$$

где  $a$  - коэффициент, выбираемый в зависимости от условий работы, обычно  $a < 0,5$ ;  $P_1$  – горизонтальная составляющая сопротивления копанию.



Исследованиями И.А.Недорезова установлена геометрия отвала, обеспечивающая рациональное движение грунта. Такой отвал наиболее широко используется на бульдозерах общего назначения.

Аналитические методы расчета сил сопротивления копанию детально исследовались в работах К.А.Артемьева, В.И.Баловнева, Ю.А.Ветрова, Г.Туго, А.Аусен и др. Развитие эти методы получили после работ В.В.Соколовского в области механики грунтов.

Е.И.Берестов обосновал существование двух фаз разрушения грунта и разработал методы расчета угла сдвига и колебаний силы сопротивления при разработке грунта. Разработанный им метод расчета копания бульдозером позволяет рассчитать все параметры, которые можно измерить при помощи приборов, поэтому данный метод расчета принят за основу.

Однако в рассмотренных работах мало внимания уделялось вопросам заглабления отвала. Известны лишь рекомендуемые ЗАО «ВНИИСтройдормаш» значения вертикальных давлений на режущей кромке, величина которых зависит от категории грунта. Отсутствуют рекомендации по оптимизации траектории заглабления отвала. Сама конструкция отвала требует изменения крепления ножей, поскольку используемое крепление непрактично.

Следовательно, исследование взаимодействия с грунтом ножей бульдозера при заглаблении отвала является актуальной и важной задачей. Разработка методики расчета данного процесса обеспечивает анализ возникающих при заглаблении отвала сопротивлений и выработку рекомендаций, направленных на их снижение, вследствие чего повышается производительность машины.

**Во второй главе** изложены разработанные методы расчета заглабления отвала бульдозера.

*Заглабление отвала бульдозера при давлениях на площадке износа, меньших предельных значений.* В этом случае зависимость между нормальным давлением  $\sigma$  и деформацией грунта  $h$  принята линейной:

$$\sigma = K_h h, \quad (1)$$

где  $K_h$  - параметр, характеризующий жесткость грунта.

Под действием заглабляющего усилия  $N$  нож деформирует грунт на начальную величину  $h_H$  (рисунок 1):

$$h_H = \frac{\sigma}{K_h} = \frac{N}{Bc_{om} K_h},$$

где  $B$  – длина отвала;  $c_{om}$  – ширина площадки износа.

При перемещении ножа на длину, равную длине одного отрезка  $\Delta c_{om}$ , произойдет перераспределение давлений на площадке износа. Это вызвано тем, что первый участок ножа  $\Delta c_{om}$  сместится на не нагруженную ранее поверхность грунта. Следовательно, подпрессовка грунта на этом участке будет равна  $h_I - h_H$ , а для



всех остальных участков  $h_1$ , поэтому и давление на первый участок будет меньшим, что вызовет соответствующее увеличение его на остальные участки площадки износа и приведет к дальнейшему заглаблению ножа. Можно считать, что

$$N = N_1 + N_{2-3} = \sigma_1 B \Delta c_{om} + \sigma_{2-3} B (c_{om} - \Delta c_{om}),$$

где  $N_1, N_{2-3}$  – силы, действующие на первый участок и остальную поверхность площадки износа;  $\sigma_1, \sigma_{2-3}$  – давления на тех же участках.

Используя формулу (1), получим для первого перемещения ножа

$$N = K_h (h_1 - h_H) B \Delta c_{om} + K_h h_1 B (c_{om} - \Delta c_{om}).$$

Аналогичным образом для второго перемещения можно получить, что

$$N = K_h (h_2 - h_1) B \Delta c_{om} + K_h (h_2 - h_H) B \Delta c_{om} + K_h h_2 B \Delta c_{om}.$$

При третьем перемещении

$$N = K_h (h_3 - h_2) B \Delta c_{om} + K_h (h_3 - h_1) B \Delta c_{om} + K_h (h_3 - h_H) B \Delta c_{om}.$$

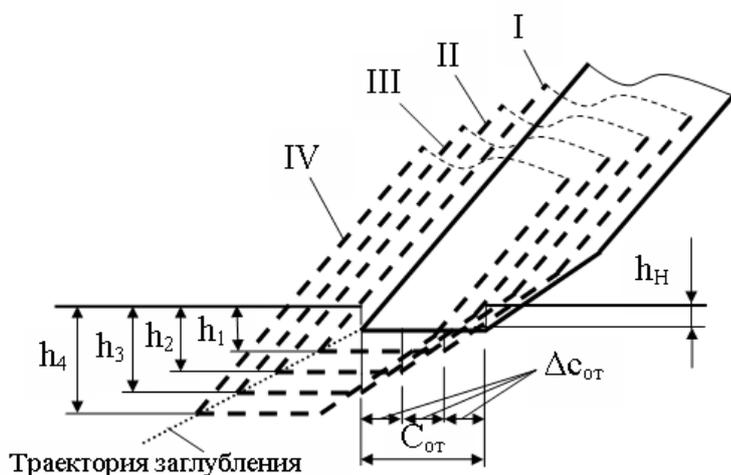
При четвертом

$$N = K_h B \Delta c_{om} [(h_4 - h_3) + (h_4 - h_2) + (h_4 - h_1)]. \quad (2)$$

При следующих смещениях влияние начального заглабления ножа  $h_H$  исчезает, и каждое последующее смещение ножа на величину  $\Delta c_{om}$  приводит к его заглаблению на величину  $\Delta h$ . Тогда формула (2) преобразуется так:

$$N = K_h B \Delta c_{om} (\Delta h + 2\Delta h + 3\Delta h) = K_h B \Delta c_{om} \sum_{m=1}^{m=k} m \Delta h = K_h B \Delta c_{om} \Delta h \sum_{m=1}^{m=k} m, \quad (3)$$

где  $m$  – номер участка площадки износа, считая от режущей кромки;  $k$  – количество участков на площадке износа.



**Рисунок 1. - Схема заглабления ножа при деформации грунта**

Заглабление ножа при одном его смещении равно:

$$\Delta h = \frac{N}{K_h B \Delta c_{om} \sum_{m=1}^{m=k} m}.$$

Полное заглабление ножа при  $n$ -м смещении

$$h = h_H + n \Delta h.$$

Если нож будет погружаться без начального погружения, то получим

$$h = n \Delta h.$$

Представим формулу (3) в виде

$$N = B \Delta c_{om} K_h \Delta h + B \Delta c_{om} K_h 2 \Delta h + B \Delta c_{om} K_h 3 \Delta h = B \Delta c_{om} \sigma_1 + B \Delta c_{om} \sigma_2 + B \Delta c_{om} \sigma_3 = N_1 + N_2 + N_3 ,$$

где  $N_1, N_2, N_3, \sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$  – силы и давления, действующие на участки.

Тогда можно получить, что

$$\sigma_1 = K_h \Delta h ; \sigma_2 = 2 K_h \Delta h ; \sigma_3 = 3 K_h \Delta h \text{ или } \sigma_m = m K_h \Delta h .$$

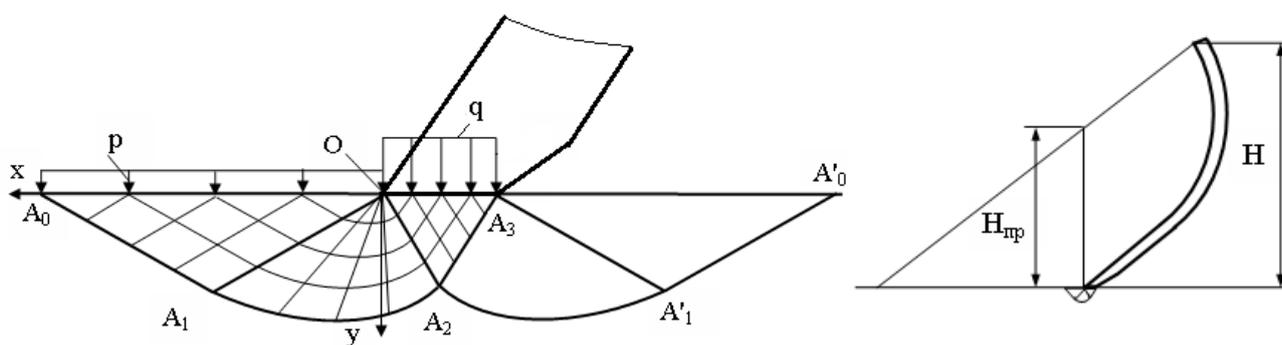
Следовательно, по мере приближения к задней кромке (с увеличением номера участка площадки износа) будет увеличиваться и действующее на него при заглублении отвала давление.

**Заглубление отвала бульдозера при предельных давлениях на площадке износа.** Для решения этой задачи использовалась теория предельного равновесия сыпучей среды, обладающей сцеплением, разработанная В.В.Соколовским.

**Заглубление неподвижного отвала на начальной стадии** (рисунок 2). В этом случае разрушающее приведенное давление

$$q = p \frac{1 + \sin \rho}{1 - \sin \rho} \exp(\pi \operatorname{tg} \rho) , \quad (4)$$

где  $p$  – приведенное давление на поверхность грунта перед ножом;  $\rho$  – угол внутреннего трения грунта.



**Рисунок 2. - Расчетная схема заглубления неподвижного отвала**

Действительное разрушающее давление найдется так:

$$q' = q - H ,$$

где  $H = c \operatorname{ctg} \rho$  – давление связности;  $c$  – удельное сцепление грунта.

Приведенное давление на поверхность грунта перед ножом при неподвижном отвале является нормальным и равно сумме действительного давления  $p'$  от слоя грунта высотой  $H_{пр}$ , находящегося над режущей кромкой отвала призмы волочения, и давления связности  $H$ , то есть

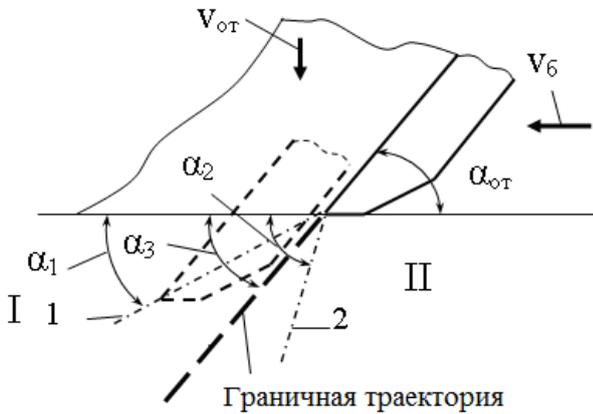
$$p = p' + H = \rho_2 g H_{пр} + c \operatorname{ctg} \rho , \quad (5)$$

где  $\rho_2$  – плотность грунта в призме волочения;  $g$  – гравитационное ускорение.

При отсутствии призмы волочения в формулу (4) следует подставлять  $p = H$ .

Поскольку поверхность грунта, расположенная за ножом, не испытывает дополнительных давлений, то его разрушение при отсутствии призмы волочения произойдет в обе стороны, а при ее наличии - в сторону задней части отвала.

*Заглубление движущего отвала на начальной стадии.*



**Рисунок 3. - Схема движения отвала при разных скоростях**

Положение граничной траектории (угол  $\alpha_3$ ) определяется так:

$$\alpha_3 = \operatorname{arctg} \frac{v_{от}}{v_б} = \alpha_{от},$$

где  $\alpha_{от}$  – угол резания;  $v_{от}$  – скорость заглубления отвала;  $v_б$  – скорость перемещения бульдозера.

При заглублении *движущего отвала при подвижной призме волочения* (рисунок 4) приведенное давление на поверхность грунта равно геометрической сумме действительного давления  $p'$  и давления связности  $H$ , то есть  $\bar{p} = \bar{p}' + \bar{H}$ . Тогда

$$p = \sqrt{(H + p'_\sigma)^2 + p'_\tau{}^2} = \sqrt{(c \operatorname{ctg} \rho + p'_\sigma)^2 + (p'_\sigma \operatorname{tg} \rho)^2},$$

где  $p'_\sigma = \rho g H_{np}$  – нормальное давление призмы волочения на грунт вблизи режущей кромки.

Угол отклонения от нормали  $\delta_1$  приведенного давления  $p$

$$\delta_1 = \operatorname{arctg} \frac{p'_\sigma \operatorname{tg} \rho}{c \operatorname{ctg} \rho + p'_\sigma}.$$

В этом случае для расчета приведенного давления  $q$  получена формула

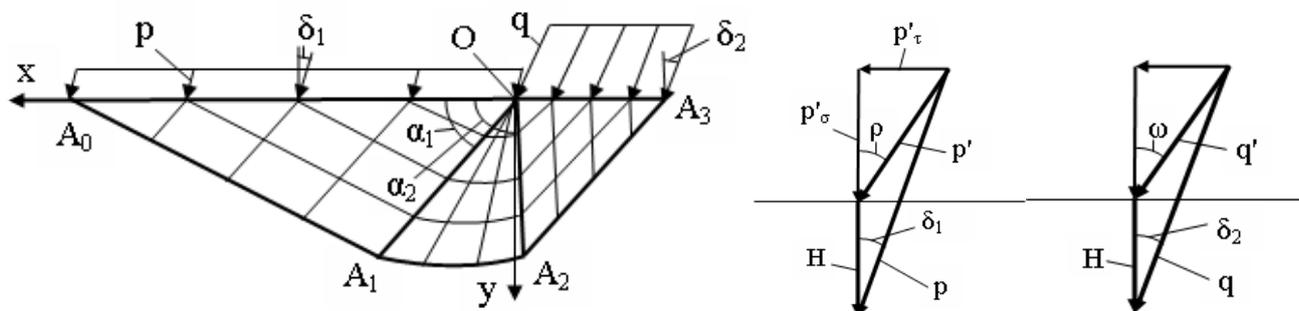
$$q = p \frac{\sin \Delta_1}{\sin (\Delta_1 - \delta_1)} \frac{\sin (\Delta_2 + \delta_2)}{\sin \Delta_2} \exp[(\pi - \Delta_2 - \delta_2 - \Delta_1 + \delta_1) \operatorname{tg} \rho]. \quad (6)$$

При использовании этой формулы нужно учесть, что угол отклонения  $\delta_2$  приведенного давления  $q$ , действующего со стороны площадки износа ножа на грунт, зависит от действительного давления  $q'$ .

В соответствии со схемой на рисунке 4, приведенное давление  $q$  и угол его отклонения  $\delta_2$  равны

$$q = \sqrt{(q' \cos \omega + H)^2 + (q' \sin \omega)^2}; \quad \delta_2 = \arctg \frac{q' \sin \omega}{q' \cos \omega + H}, \quad (7)$$

где  $\omega$  – угол трения грунта по ножу.



**Рисунок 4. - Схемы для расчета приведенных давлений при движущихся отвале и призме волочения**

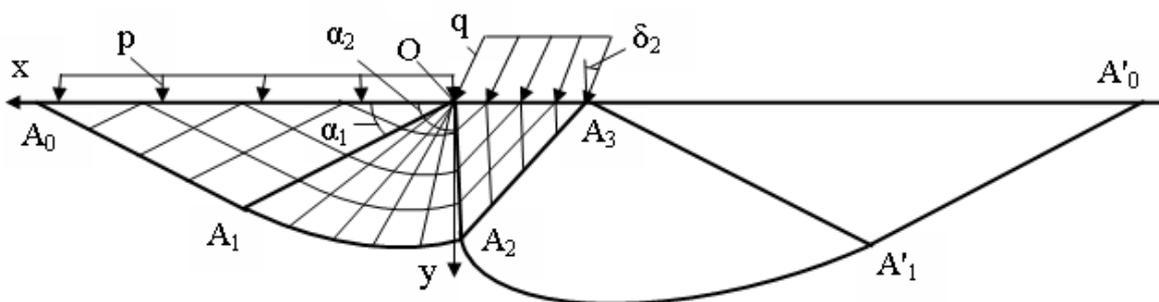
В связи с этим для определения разрушающего давления  $q$  необходимо использовать итерационные методы вычисления.

Переход к действительному давлению  $q'$  осуществляется так:

$$q' = \sqrt{(q \cos \delta_2 - H)^2 + (q \sin \delta_2)^2}. \quad (8)$$

В момент заглужения *движущего отвала при неподвижной призме волочения* (рисунок 5) приведенное разрушающее давление

$$q = p \frac{\sin(\Delta_2 + \delta_2)}{(1 - \sin \rho) \sin \Delta_2} \exp[(\pi - \Delta_2 - \delta_2) \operatorname{tg} \rho]. \quad (9)$$



**Рисунок 5. - Схема заглужения подвижного отвала при неподвижной призме волочения**

При этом приведенное давление  $p$  определяется по уравнению (5).

При движущемся отвале выпор грунта в сторону задней части отвала будет происходить при давлении

$$q = H \frac{\sin(\Delta_2 + \delta_2)}{(1 - \sin \rho) \sin \Delta_2} \exp[(\pi + \Delta_2 + \delta_2) \operatorname{tg} \rho]. \quad (10)$$

Выбирается вариант, при котором разрушающее приведенное давление  $q$  будет минимальным.

К данной расчетной схеме относится и случай, при котором *движущийся отвал заглубляется без призмы волочения*, тогда в формулу (9) подставляется  $p=H$ .

При *заглублении отвала при копании* перед режущей кромкой отвала существуют наклонные площадки сдвига.

При заглублении *неподвижного отвала* устойчивость грунта будет меньшей в сторону задней части отвала. Для этого случая можно использовать уравнение (4) при  $p=H$ .

При *движении отвала и движении грунта* по его поверхности (рисунок 6) рассматриваются два случая. При формировании площадки сдвига, когда на ней выполняется условие  $\delta_1=\rho$ , предельное давление

$$q = p \frac{\sin(\Delta_2 + \delta_2)}{\sin \Delta_2 \cos \rho} \exp\left[\left(\frac{\pi}{2} - \Delta_2 - \delta_2 + \rho + 2\psi\right) \operatorname{tg} \rho\right].$$

Для расчета предельного давления после образования площадки сдвига получена формула

$$q = p \frac{\sin \Delta_1}{\sin(\Delta_1 - \delta_1)} \frac{\sin(\Delta_2 + \delta_2)}{\sin \Delta_2} \exp\left[\left(\pi - \Delta_2 - \delta_2 - \Delta_1 + \delta_1 + 2\psi\right) \operatorname{tg} \rho\right].$$

Последний вариант разрушения, когда нож заглубляется под углом  $\alpha > \alpha_{om}$ , при котором *нет перемещения грунта по отвалу*, рассчитывается так.

Сила  $Q_{cp}$ , (рисунок 7), действующая на сторону BD призмы OBD, равна

$$Q_{cp} = q_{cp} l_{BD},$$

где  $q_{cp}$  – давление на площадку BD, за которое можно принимать давление грунта высотой  $H_{гр}$ ;  $l_{BD}$  – длина этой площадки.

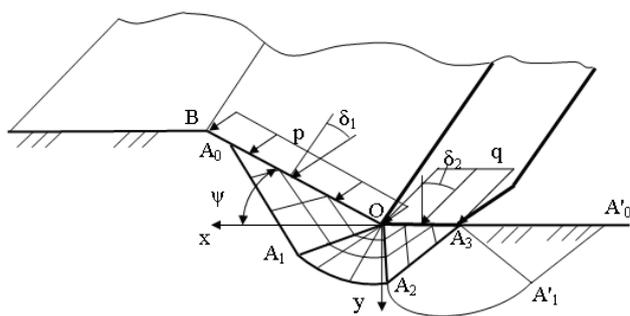


Рисунок 6. - Схема заглубления отвала при копании и движении срезанного грунта

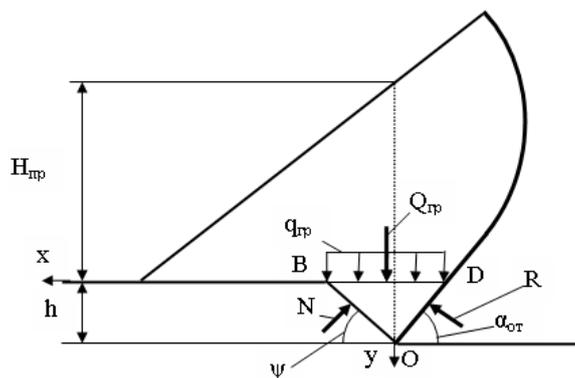


Рисунок 7 - Схема заглубления отвала при высокой скорости заглубления

Из условий равновесия призмы OBD можно получить, что

$$R = N \frac{\sin \psi}{\sin \alpha_{om}}, \quad N = Q_{cp} \frac{\sin \alpha_{om}}{\sin(\alpha_{om} + \psi)}.$$



Действительное давление  $p'$  от этой силы и приведенное давление  $p$  равны

$$p' = \frac{N \sin \psi}{h}, \quad p = p' + H.$$

Схема разрушения грунта для этого случая изображена на рисунке 8. Для нее

$$q = p \frac{\sin(\Delta_2 + \delta_2)}{(1 - \sin \rho) \sin \Delta_2} \exp[(\pi - \Delta_2 - \delta_2 + 2\psi) \operatorname{tg} \rho].$$

При разрушении грунта в заднюю сторону справедливо уравнение 9. Действительное разрушающее давление  $q'$  находится по формуле (8).

**Кинематические особенности разрушения грунта площадкой износа.** Из рисунка 9 видно, что угол  $\varphi_2$  между направлением наибольшего главного напряжения и осью  $x$  определяет положение площадок скольжения в зоне  $OA_2A_3$ , расположенной под площадкой износа  $OA_3$ . Заглубление отвала под углом

$$\beta = \operatorname{arctg} \frac{v_{om}}{v_0} = \varphi_2$$

обеспечивает появление предельных давлений сразу во всей зоне  $OA_2A_3$  и, следовательно, более быстрое заглубление отвала.

Если угол наклона траектории заглубления будет меньшим, чем  $\varphi_2$ , площадка износа при заглублении будет попадать на новый участок грунта, что нарушит условия его разрушения и снизит величину заглубления.

Учитывая, что отвал более эффективно заглубляется при движущейся призме волочения, целесообразно его заглублять под углом  $\beta = \varphi_2 < \alpha_{om}$ .

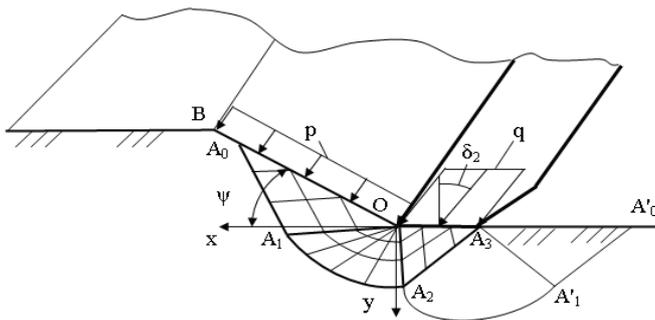


Рисунок 8. - Схема заглубления отвала при копании и неподвижном грунте в призме волочения

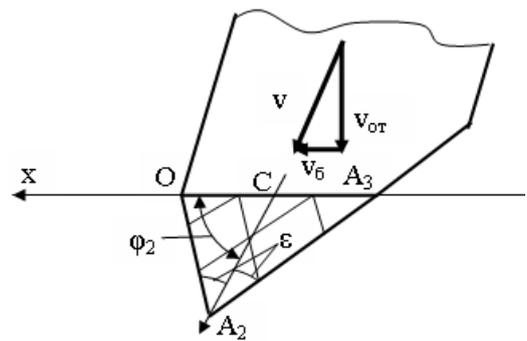


Рисунок 9. - Схема зоны разрушения грунта под площадкой износа

**Давление, действующее на площадку износа при движении отвала без заглубления.** При копании от давления  $q'$  под площадкой сдвига происходит сжатие грунта (рисунок 10) на величину  $\Delta l_{OB}$

$$\Delta l_{OB} = \frac{q' \cos \rho}{K_h}.$$

Деформация грунта в вертикальной плоскости будет равна

$$\Delta h_{OB} = \Delta l_{OB} \cos \psi = \frac{q' \cos \rho \cos \psi}{K_h}.$$

Попадание под площадку износа ножа грунта, деформированного на величину  $\Delta h_{OB}$  в вертикальной плоскости, приводит к его давлению на площадку износа ножа, которая препятствует расширению грунта вверх. Величина этого давления будет равна

$$q_N = K_h \Delta h_{OB}.$$

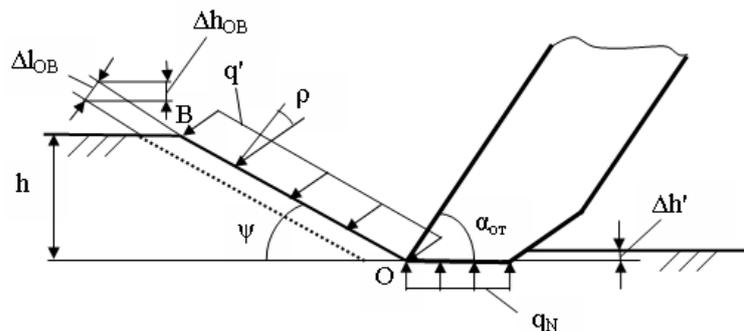


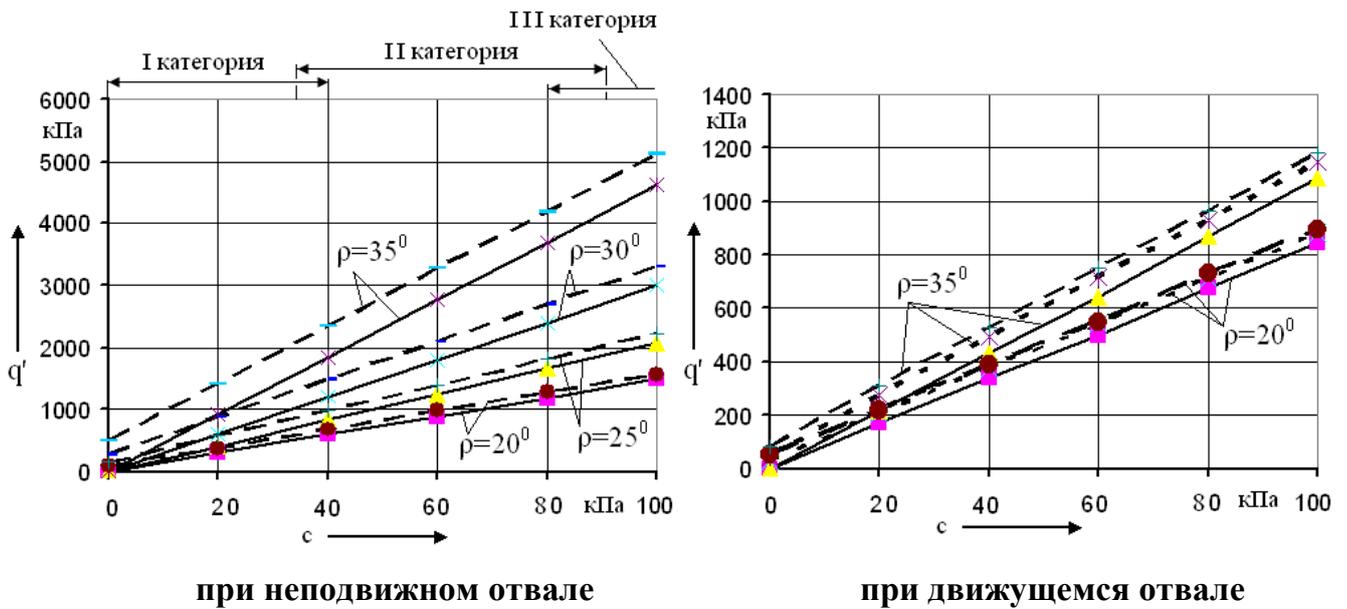
Рисунок 10. - Схема для расчета давлений на площадку износа

После прохождения ножа с поверхности грунта снимается давление, что приводит к его расширению на некоторую величину упругих деформаций  $\Delta h'$ . В итоге площадка износа при копании постоянно находится под действием давлений, приводящих к появлению дополнительных сил трения и способствующих интенсивному ее износу.

В третьей главе приведены результаты теоретических исследований заглабления отвала применительно к бульдозеру Б10М. На рисунке 11 показано влияние свойств грунта на величину разрушающего действительного давления  $q'$  при заглаблении неподвижного и движущегося отвала.

Давление  $q'$  при заглаблении неподвижного отвала зависит как от удельного сцепления, изменяющегося в широких пределах в зависимости от категории грунта, так и от его внутреннего трения, которое для большинства грунтов находится в пределах  $25-30^\circ$ . Влияние призмы волочения хотя и существенно, но при неподвижном отвале представляет собой теоретический интерес, поскольку грунт разрушается в сторону задней части отвала, где нет призмы волочения.

При заглаблении движущегося отвала разрушающее давление  $q'$  значительно меньше, но увеличивается давление, необходимое для разрушения грунта в сторону задней части ножа, и такое разрушение становится невозможным. Так, при  $\rho=30^\circ$  оно в 5,75 раза превышает давление, необходимое для разрушения грунта в сторону передней части. Рациональный угол траектории заглабления отвала при наиболее характерном угле внутреннего трения  $\rho=30^\circ$  равен  $50^\circ = \beta \leq 55^\circ$ .



**Рисунок 11. – Влияние свойств грунта на величину давления  $q'$  при отсутствии призмы волочения (сплошные линии) неподвижной (штриховые линии) и движущейся (точечные линии) призме волочения**

На рисунке 12 изображены результаты расчетов заглубления отвала при копании при  $\rho=30^\circ$ , где видно, что отвал легче заглубить в момент большого сдвига, а наиболее трудно – сразу после появления устойчивой площадки сдвига. Так, если при  $h=0,05$  м и  $c=100$  кПа в первом случае для разрушения грунта требуется давление 1030 кПа, то во втором - почти в два раза больше (2030 кПа). Следовательно, при заглублении отвала действуют значительные по величине колебания разрушающего давления. Причина их такая же, как и при копании – при быстром формировании площадки сдвига резко изменяются нагрузки на ее поверхности из-за разрушения сцепления.

Если отвал заглублять быстро, так, что призма волочения остается неподвижной, то разрушающее давление будет находиться между крайними значениями (штриховая линия). При тех же условиях ( $h=0,05$  м и  $c=100$  кПа) оно будет равно 1660 кПа. Толщина стружки незначительно влияет на результаты расчетов.

Во всех случаях разрушение грунта в сторону задней части отвала не происходит, так как для этого требуется давление в 3,2-5,7 раз больше, чем приведенные на графике значения. Рациональный угол траектории заглубления в рассматриваемом случае должен быть  $47^\circ = \beta < 55^\circ$ .

Заглубление отвала непредельными давлениями рассматривалось при ширине площадки износа 14 мм (новые ножи) и 25 мм (полностью изношенные). На рисунке 13 показаны результаты расчетов величины заглубления ножа  $h$  при прохождении им пути  $l=100$  мм в зависимости от заглубляющего усилия  $N$  для II и III категорий грунта.

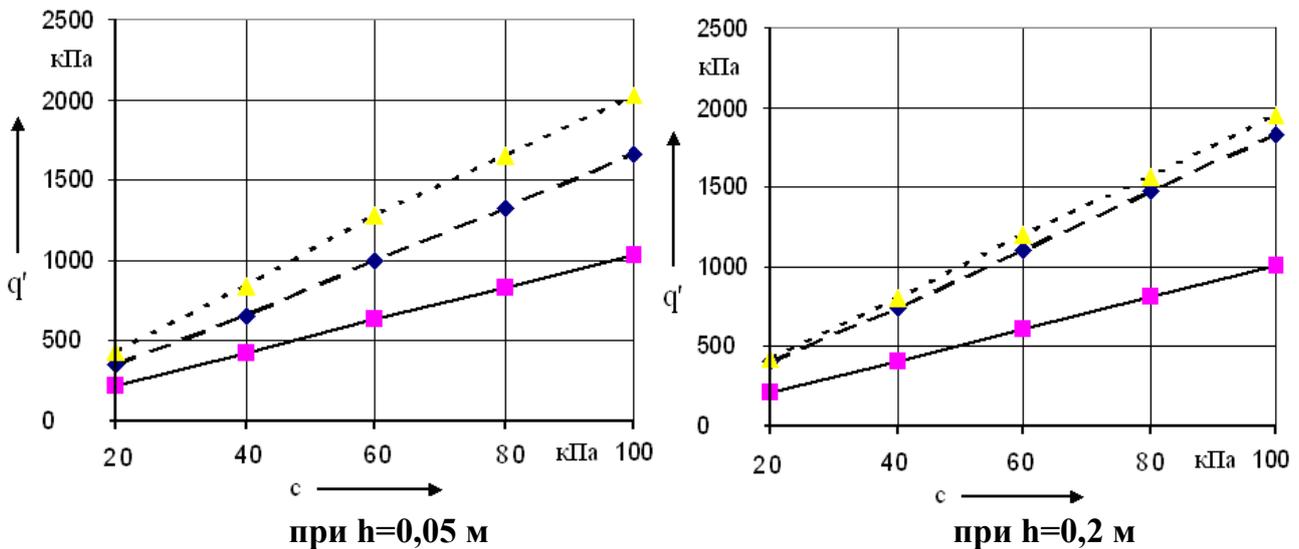


Рисунок 12. - Влияние удельного сцепления грунта  $c$  на величину разрушающего давления  $q'$  при неподвижной призме волочения (штриховая линия), в момент формирования (сплошная линия) и после окончания формирования площадки сдвига (точечная линия)

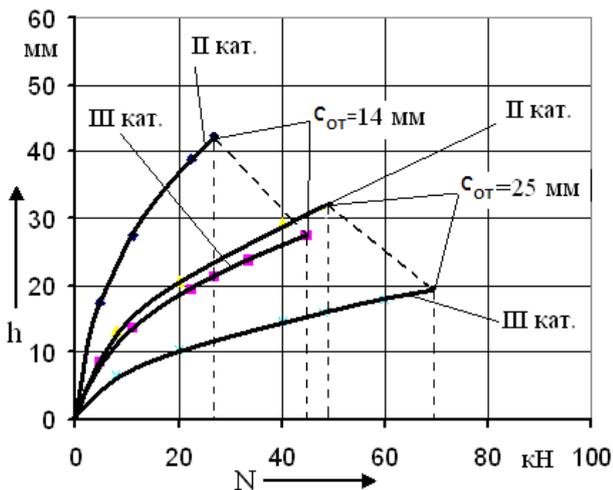


Рисунок 13. - Влияние заглубляющего усилия  $N$  на величину заглубления отвала  $h$  на пути 100 мм при разных размерах площадки износа  $c_{от}$

Из рисунка видно, что увеличение площадки износа с 14 мм до 25 мм (в 1,8 раза) примерно на эту же величину уменьшает глубину погружения отвала. Почти так же влияют и свойства грунта, снижающие величину заглубления примерно в 2 раза на грунтах III категории.

В четвертой главе дано описание экспериментальных исследований, которые проводились в полевых условиях на полигоне и в лабораторных условиях в грунтовом канале кафедры СДПТМиО Белорусско-Российского университета. Основной целью проведения таких исследований является подтверждение результатов и рекомендаций, полученных вычислениями.

При проведении опытов на натурной машине трактор вывешивался на отвале, что обеспечивало постоянное усилие заглубления. После этого начиналось движение трактора на разных передачах (I и III). При большой скорости трактора грунт под площадкой износа не успевает получить необходимую деформацию, поскольку площадка износа частично перемещается на новый участок грунта, не подвергавшийся давлению. Движение на разных передачах должно было приве-

сти к изменению траектории заглабления. Проведенные исследования подтвердили это. Величина заглабления при движении на III передаче составляла 50-60% от заглабления отвала при движении на I передаче. Аналогичные результаты получены и при проведении лабораторных исследований.

Так как конструкция стенда не обеспечивает заглабление отвала при разных углах наклона траектории, был разработан метод замера разрушающих усилий, изображенный на рисунке 14.

Датчик горизонтального усилия стенда позволяет замерить силу  $P_1$ , тогда сила  $R$  будет равна  $R = \frac{P_1}{\sin(\alpha + \omega)}$ , а нормальная сила -  $N = R \cos \omega = \frac{P_1 \cos \omega}{\sin(\alpha + \omega)}$ .

Изменение угла наклона поверхности грунта  $\alpha$  при горизонтальном перемещении ножа, обеспечивает имитацию разных траекторий заглабления ножа с замером необходимых усилий.

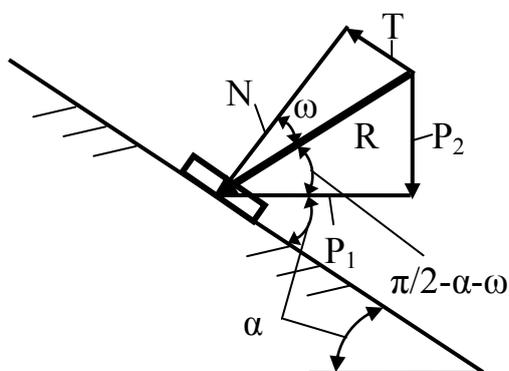


Рисунок 14. – Расчетная схема

Результаты подтвердили предположение, что отклонение угла траектории заглабления от рационального значения приводит к ухудшению заглабления за счет того, что площадка износа попадает на участки грунта, ранее не подвергавшиеся давлению.

Сопоставительный анализ показал, что разработанные теоретические положения и методы расчета дают хорошую сходимость результатов с экспериментальными данными. Их расхождение, в зависимости от скорости движения рабочего органа, находится в пределах 8-28% для непредельных давлений и 12% - для предельных при траектории заглабления, близкой к расчетной.

В этой главе приведено описание рекомендуемой конструкции отвала, не вызывающей затруднений при перестановке ножей, позволяющей работать с острой режущей кромкой и более экономно использовать материал ножа. Это обеспечивает снижение сопротивлений при копании и заглаблении отвала.

Рекомендована также термообработка ножей, обеспечивающая их самозатачивание при эксплуатации. При заглаблении такого ножа потребуются меньшие усилия на протяжении всего срока эксплуатации.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

### Основные научные результаты диссертации

1. На основании анализа работы бульдозера установлены факторы, оказывающее наибольшее влияние на заглубление отвала, и выбраны расчетные положения, наиболее характерные для этого процесса. Для них разработаны аналитические методы расчета параметров, использование которых при проектировании бульдозеров позволит более обоснованно оценивать возможности заглубления отвала при разработке грунтов разных категорий /1, 2, 3, 4, 7/.

2. На основе теории предельного состояния грунтовых масс и теории копания грунта бульдозером разработаны аналитические зависимости для расчета предельных давлений при заглублении отвала, которые учитывают стадии заглубления (начальная стадия или заглубление при копании), движения отвала (движущийся или неподвижный), наличия и состояния призмы волочения (смещается она отвалом или нет).

Установлено, что смещение призмы волочения движущимся отвалом обеспечивается в том случае, если угол наклона траектории заглубления режущей кромки не будет превышать угол резания /1, 2, 3/.

3. В результате исследований установлено, что наиболее интенсивное заглубление обеспечивается при движении отвала и призмы волочения, когда разрушающие давления минимальны.

При заглублении отвала в процессе копания происходит скачкообразное изменение разрушающего давления из-за разрушения сцепления на площадке сдвига. Минимальное предельное давление при заглублении отвала требуется в момент формирования площадки большого сдвига, которое для грунта III категории равно 1030 кПа при  $h=0,05$  м и 1010 кПа при  $h=0,2$  м, что почти в два раза меньше таких же давлений, необходимых для разрушения грунта после формирования площадки сдвига. При этом, в отличие от сопротивления копанию, разрушающее давление после разрушения сцепления на площадке сдвига не уменьшается, а увеличивается.

При движущемся отвале разрушение грунта в сторону задней части отвала невозможно, так как для этого требуется давление в 3,2-5,7 раз выше. При заглублении неподвижного отвала и отсутствии призмы волочения эти давления равны, а при ее наличии происходит разрушение грунта в сторону задней части отвала /1, 2, 3, 7/.

4. Обоснован рациональный угол траектории заглубления рабочего органа, обеспечивающий наиболее эффективное заглубление отвала. Он равен углу наклона наибольших главных напряжений в зоне, расположенной под площадкой износа ножа бульдозера, и не должен превышать угол резания. Для большинства

грунтов, разрабатываемых бульдозером, рациональный угол находится в пределах  $47^\circ - 50^\circ < \alpha_{от} = 55^\circ$  /1, 2, 3/.

5. Разработан метод расчета заглубления отвала для случая, когда давления на площадке износа не являются предельными, а заглубление осуществляется лишь за счет деформаций грунта. Метод позволяет увязать между собой величину заглубления отвала с геометрическими и силовыми характеристиками, от которых зависит давление на площадке износа, а также с деформационными свойствами разрабатываемого грунта, и получить количественную картину распределения давлений по длине площадки износа для данного типа заглубления.

Установлено, что при неопредельных давлениях увеличение длины площадки износа в 1,8 раза (до максимальной величины) на такую же величину уменьшает глубину погружения отвала. Увеличение категории грунта с II до III снижает величину заглубления примерно в 2 раза. При малой скорости заглубления отвала и большой скорости бульдозера грунт под ножом может не получить необходимых для достижения предельных давлений деформаций /1, 4/.

6. Разработан метод расчета давлений, действующих на площадку износа ножа при копании без заглубления отвала. Их величина на грунтах II категории находится в пределах 30...85 кПа в зависимости от степени заполнения отвала грунтом. Эти давления вместе с давлениями, действующими при заглублении ножа, приводят к интенсивному износу нижней грани ножа /5, 6/.

7. Разработаны и запатентованы конструкции отвала, использующие эффект самозатачивания ножей /8, 9/.

### **Рекомендации по практическому использованию результатов**

Разработанные методы расчета заглубления отвала бульдозера могут использоваться в специализированных конструкторских отделах предприятий, разрабатывающих рабочее оборудование бульдозеров и автогрейдеров. Результаты работы могут использоваться как в Республике Беларусь (Минский завод ОАО Амкодор-Ударник, Филиал ОАО «БЕЛАЗ»-ХОЛДИНГ» - «Могилевский автомобильный завод имени С. М. Кирова» и др.), так и в Исламской Республике Иран (фирма Heavy Equipment Production CO «Нерсо»).

Результаты работы используются в учебном процессе кафедры СДПТМиО ГУ ВПО «Белорусско-Российский университет» при проведении лабораторных занятий и в дипломном проектировании.

Методы расчета заглубления отвала бульдозера и рекомендации по усовершенствованию конструкции приняты для использования фирмой Vulkan Alborz co.Ltd (Исламская Республика Иран).

Разработаны конструкции отвала бульдозера и ножей /8, 9/, защищенные патентами, позволяющие повысить эффективность заглубления отвала бульдозера.



## СПИСОК ПУБЛИКАЦИЙ СОИСКАТЕЛЯ

**Монографии**

1. Берестов, Е.И. Взаимодействие рабочего оборудования и гусеничных траков землеройных машин с грунтом : монография / Е.И.Берестов, А.В.Кулабухов, А.П.Смоляр, А.Х.Афгами Алишах, Э.Х.Джалилванд. – Могилев: Белорус.-Рос. ун-т, 2013. – 184 с.

**Статьи**

2. Берестов, Е.И. Расчет заглубления отвала бульдозера / Е.И.Берестов, Э.Х.Джалилванд // Строительные и дорожные машины. – 2012. - №10. - С. 38-44.

3. Берестов, Е.И. Расчет предельного давления на грунт при заглублении отвала бульдозера / Е.И.Берестов, Э.Х.Джалилванд // Строительная наука и техника. – 2012. - № 1 (40). - С. 52-58.

4. Берестов, Е.И. Заглубление ножей отвала бульдозера при непределном давлении на грунт / Е.И.Берестов, Э.Х.Джалилванд // Строительная наука и техника. – 2012. - № 2 (41). - С. 86-89.

5. Берестов, Е.И. Давление на площадку износа ножей землеройно-транспортных машин / Е.И.Берестов, Э.Х.Джалилванд // Вестник Белорусско-Российского университета. – 2014. - № 4 (45). - С. 6-12.

**Материалы конференций**

6. Берестов, Е.И. Распределение давлений по поверхности ножа при резании грунта / Е.И.Берестов, А.Х.Афгами Алишах, Э.Х.Джалилванд // Интерстроймех – 2011: Материалы междунар. науч.-техн. конф. - Могилев, 2011. – С. 26-29.

**Тезисы докладов**

7. Джалилванд, Э.Х. Расчет сопротивлений при заглублении отвала бульдозера / Э.Х.Джалилванд // Интерстроймех – 2011: Материалы междунар. науч.-техн. конф. - Могилев, 2011. – С. 66.

**Патенты**

8. Отвал землеройной машины : пат. 9002 Респ. Беларусь, МПК Е 02 F 3/64 / Е.И.Берестов, А.Х.Афгами Алишах, Э.Х.Джалилванд ; заявитель Бел.-Рос. ун-т. - № u 20120719.

9. Рабочее оборудование землеройной машины : пат. 9000 Респ. Беларусь, МПК Е 02 F 3/64 / Е.И.Берестов, А.Х.Афгами Алишах, Э.Х.Джалилванд ; заявитель Бел.-Рос. ун-т. - № u 20120718 ; заявл. 26.07.2012.



## РЭЗІЮМЭ

Джалілванд Эхсан Харам

### ПАРАМЕТРЫ ЗАГЛЫБЛЕННЯ АДВАЛУ ПРЫ РОЗНЫХ РЭЖЫМАХ РАБОТЫ БУЛЬДОЗЕРА

**Ключавыя словы:** заглыбленне адвалу, гранічны і негранічны ціск, метады разліку, траекторыя заглыблення, рэкамендацыі.

**Мэта даследавання:** распрацоўка метадаў разліку і абгрунтаванне параметраў, дазваляючых паскорыць заглыбленне адвалу бульдозера ў грунт.

**Стварэнне аналітычных метадаў разліку** заглыблення адвалу пры гранічных і негранічных цісках на грунт базіравалася на сучасных уяўленнях пра механіку разбурэння грунту. Эксперыментальныя даследаванні праводзіліся ў грунтавым канале і на палігоне кафедры «Будаўнічыя, дарожныя, пад'ёмна-транспартныя машыны і абсталяванне» Беларуска-Расійскага ўніверсітэта.

**Навуковая навізна атрыманых вынікаў.** Распрацаваны аналітычныя ўраўненні, якія забяспечваюць разлік гранічных ціскаў пры заглыбленні адвалу, з улікам магчымых злучэнняў нармальнага і нахільнага ціскаў на стрымліваючай паверхні грунту і разбураючай паверхні пад пляцоўкай зносу нажа, і метады разліку гэтых ціскаў, якія ўлічваюць умовы заглыблення адвалу пры розных рэжымах работы.

Распрацаваны метады разліку заглыблення адвалу пры негранічных цісках на грунт, які дазваляе разлічваць вугал нахілу траекторыі яго заглыблення з улікам велічыні пляцоўкі зносу на нажах бульдозера і ціскаў, якія дзейнічаюць на яе.

Распрацаваны метады разліку ціскаў, якія дзейнічаюць на пляцоўку зносу нажа пры капанні без змянення таўшчыні стружкі і вядуць да інтэнсіўнага зносу ніжняга боку нажа.

Абгрунтаваны рэкамендацыі па выбару вугла нахілу траекторыі заглыблення адвалу і па змяненню канструкцыі адвалу, якія дазваляюць павысіць эфектыўнасць работы бульдозера.

**Распрацаваныя метады разліку** могуць выкарыстоўвацца пры праектаванні бульдозераў для аптымізацыі параметраў адвалу і яго прывада.

**Вобласць прымянення.** Рабочае абсталяванне бульдозераў.



## РЕЗЮМЕ

Джалилванд Эхсан Хоррам

### ПАРАМЕТРЫ ЗАГЛУБЛЕНИЯ ОТВАЛА ПРИ РАЗНЫХ РЕЖИМАХ РАБОТЫ БУЛЬДОЗЕРА

**Ключевые слова:** заглубление отвала, предельные и непредельные давления, методы расчета, траектория заглубления, рекомендации.

**Цель исследования:** разработка методов расчета и обоснование параметров, способствующих интенсификации заглубления рабочего органа бульдозера в грунт.

**Создание аналитических методов расчета** заглубления отвала при предельных и непредельных давлениях на грунт базировалось на современных представлениях о механике разрушения грунта. Экспериментальные исследования проводились в грунтовом канале и на полигоне кафедры «Строительные, дорожные, подъемно-транспортные машины и оборудование» Белорусско-Российского университета.

**Научная новизна полученных результатов.** Разработаны аналитические уравнения, обеспечивающие расчет предельных давлений при заглублении отвала, учитывающие возможные сочетания нормальных и наклонных давлений на удерживающей поверхности грунта и разрушающей поверхности под площадкой износа ножа, и методы расчета этих давлений, учитывающие условия заглубления отвала при разных режимах работы.

Разработан метод расчета заглубления отвала при непредельных давлениях на грунт, позволяющий рассчитывать угол наклона траектории его заглубления с учетом величины площадки износа на ножах бульдозера и давлений, действующих на нее.

Разработан метод расчета давлений, действующих на площадку износа ножа при копании без изменения толщины стружки и приводящих к интенсивному износу нижней стороны ножа.

Обоснованы рекомендации по выбору угла наклона траектории заглубления отвала, а также по изменению конструкции отвала, позволяющие повысить эффективность работы бульдозера.

**Разработанные методы расчета** могут использоваться при проектировании бульдозеров для оптимизации параметров отвала и его привода.

**Область применения.** Рабочее оборудование бульдозеров.



## ABSTRACT

Jalilvand Ehsan Khorram

### PARAMETERS OF BLADE PENETRATION IN DIFFERENT MODES OF BULLDOZER OPERATION

**Keywords:** blade penetration, maximum and unlimited pressures, calculation methods, trajectory of penetration, recommendations.

**Objective of the research:** to develop calculation methods and to substantiate parameters intensifying ground penetration of the bulldozer operating member.

**The development of analytical methods for calculating** blade penetration under maximum and unlimited ground pressures was based on the modern concepts of mechanics of soil fracture. Experiments were conducted in the soil canal and on the training ground of the Construction, Road Construction and Jack Transporting Machines department of Belarusian-Russian University.

**Scientific novelty of the obtained results.** The analytical equations have been developed to calculate maximum pressures during blade penetration, which take into account possible combinations of normal and inclined pressures on the surface of the ground and the collapsing surface under the blade wear area, and the methods to calculate these pressures have been worked out, taking into account the conditions of blade penetration in different operating modes.

The method for calculating the blade penetration under unlimited pressures on the ground has been developed, which calculates the inclination angle of the trajectory of its penetration, with the size of wear area on bulldozer blades and pressures acting on it being taken into account.

The method has been developed to calculate pressures acting on the wear area of a blade in digging without changing chip thickness, resulting in intensive wear of the blade underside.

The recommendations for the selection of inclination angle of the trajectory of blade penetration and for the modification of blade design have been substantiated which allow increasing the efficiency of bulldozer operation.

**The calculation methods developed** can be used in the design of bulldozers to optimize parameters of the blade and its drive.

**Area of application.** Operational equipment of bulldozers.



*Научное издание*

ДЖАЛИЛВАНД Эхсан Хоррам

ПАРАМЕТРЫ ЗАГЛУБЛЕНИЯ ОТВАЛА  
ПРИ РАЗНЫХ РЕЖИМАХ РАБОТЫ БУЛЬДОЗЕРА

Автореферат  
диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Специальность 05.05.04 - дорожные, строительные  
и подъемно-транспортные машины



Подписано в печать 06.10.2015. Формат 60×84/16/ Бумага офсетная. Гарнитура Таймс.  
Печать трафаретная. Усл.-печ. л. 1,63. Уч.-изд. л. 1,79. Тираж 60 экз. Заказ №628.

Издатель и полиграфическое исполнение:  
Государственное учреждение высшего профессионального образования  
«Белорусско-Российский университет».  
Свидетельство о государственной регистрации издателя,  
изготовителя, распространителя печатных изданий  
№ 1/156 от 24.01.2014.  
Пр. Мира, 43,212000, Могилев.