

Министерство образования Республики Беларусь  
Министерство образования и науки  
Российской Федерации  
Государственное учреждение  
высшего профессионального образования  
«Белорусско-Российский университет»

# **ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ РАБОЧЕГО ОБОРУДОВАНИЯ И ГУСЕНИЧНЫХ ТРАКОВ ЗЕМЛЕРОЙНЫХ МАШИН С ГРУНТОМ**

Под общей редакцией  
доктора технических наук, профессора Е. И. Берестова

Могилев  
«Белорусско-Российский университет»  
2013

УДК 621.879

Рекомендовано к опубликованию Советом Белорусско-Российского университета «30» ноября 2012 г., протокол № 3

Авторы : Е. И. Берестов, А. В. Кулабухов, А. П. Смоляр, А. Х. Афхами Алишах, Э. Х. Джалилванд

Рецензенты : д-р техн. наук, проф., зав. кафедрой МЖиЭСХП Белорусской государственной сельскохозяйственной академии А. С. Добышев ; канд. техн. наук, доц., директор ОАО Институт «Могилевгражданпроект» А. А. Абушкевич

**Взаимодействие** рабочего оборудования и гусеничных траков землеройных машин с грунтом : монография / Е. И. Берестов [и др.]. – Могилев : Белорус.-Рос. ун-т, 2013. – 184 с. : ил.  
ISBN 978-985-492-128-0.

В монографии изложены методы расчета параметров взаимодействия рабочего и ходового оборудования с грунтом, основанные на современных представлениях о механизме стружкообразования как о процессе, состоящем из двух фаз, первичном разрушении грунта оборудованием и последующем разрушении, при котором происходит переформирование площадки скольжения до устойчивого ее положения.

Предназначена для специалистов, занимающихся исследованиями и проектированием рабочего и ходового оборудования землеройных машин.

УДК 621.879

ISBN 978-985-492-128-0

© ГУ ВПО «Белорусско-Российский университет», 2013

## Введение

В современном строительстве одно из главных мест занимают земляные работы. Объем выполняемых земляных работ не имеет тенденции к снижению. Большая трудоемкость и энергоемкость этих работ, массовость и разнообразие вызывают необходимость развития парка землеройных машин и дальнейшего совершенствования их конструкций.

Решение проблем оптимизации параметров рабочего и ходового оборудования землеройных машин осуществляется на основе привлечения новых наукоемких технологий и инновационных решений, затрагивающих сферы проектирования, изготовления и эксплуатации этих машин. В настоящее время на первый план выдвигается создание методов расчета, наиболее полно и адекватно учитывающих особенности исследуемых процессов, позволяющих оценивать как основные, так и второстепенные параметры, доступные инструментальному замеру, более обоснованно судить о степени их адекватности реальным процессам, широко использовать автоматизированное проектирование, более полно реализовывать творческий потенциал конструкторских отделов, занимающихся проектированием землеройной техники.

В работе уделено внимание созданию таких методов расчета. Исследования, приведенные в ней, выполнены в Белорусско-Российском университете. Доктором технических наук, профессором Е. И. Берестовым написаны разделы 1, 2 и осуществлена общая редакция монографии, кандидатом технических наук, доцентом А. В. Кулабуховым написан раздел 6, кандидатом технических наук, доцентом А. П. Смоляр – раздел 3, А. Х. Афхами Алишахом – раздел 4, Э. Х. Джалилвандом – раздел 5.

Авторы выражают искреннюю признательность заведующему кафедрой МЖЭСХП Белорусской государственной сельскохозяйственной академии, доктору технических наук, профессору А. С. Добышеву и директору ОАО Институт «Могилевгражданпроект», кандидату технических наук, доценту А. А. Абушкевичу за рецензирование монографии.

# 1 Физические основы разрушения грунта

## 1.1 Краткий исторический обзор

Бурное развитие техники в 20-е гг. прошлого столетия не обошло стороной и машины для земляных работ. Это, в свою очередь, потребовало проведения большого количества исследований в этой области. Нельзя не отметить вклад советских ученых в развитие теории и совершенствование конструкций машин для земляных работ.

Основы теории резания грунта заложены академиком В. П. Горячкиным [1], который отмечал, что «сопротивление деформации пласта в качестве простейшего предположения можно считать пропорциональным площади поперечного сечения пласта». Именно это предположение широко применяется в тяговых расчетах землеройных машин и используется вплоть до настоящего времени.

Наиболее значительные работы экспериментального характера для различного вида рабочего оборудования проведены А. Н. Зелениным [2]. Им предложен метод оценки сопротивляемости грунтов резанию по числу ударов ударника ДорНИИ, являющийся общепринятым и в наши дни. Для определения сопротивлений, возникающих при разработке грунтов различными типами рабочих органов, А. Н. Зелениным предложен ряд экспериментальных формул, в которых учитывалось влияние основных геометрических параметров рабочего органа, таких как угол резания, ширина ножа, глубина резания, наличие боковых стенок и зубьев и некоторых других.

Более совершенным является основанный на использовании ряда экспериментальных коэффициентов метод, разработанный Ю. А. Ветровым [3]. Сила сопротивления резанию считается зависящей от трех основных геометрических параметров ножа: ширины, глубины и угла резания.

Рассмотренные методы расчета сопротивления грунтов резанию базируются на экспериментальных данных с вытекающими из них ограничениями. К. А. Артемьев отмечал [4], т. к. «... свойства и состояние грунта очень разнообразны, то, естественно, охватить все эти сочетания экспериментальными исследованиями ... представляется невозможным. В результате последние фиксируют лишь частные сочетания различных факторов, влияющих на сопротивление резанию, и для каждого нового

сочетания этих факторов требуется проводить новые экспериментальные исследования.

Попытку проф. А. Н. Зеленина ввести однозначную характеристику прочностных свойств грунта количеством ударов ударника ДорНИИ нельзя считать исчерпывающей ...».

Вместе с тем, рассмотренные работы, базирующиеся на экспериментальных результатах, сыграли свою роль в становлении науки о резании и копании грунтов и актуальны в настоящее время, хотя они и не охватывают весь круг вопросов, стоящих перед учеными, разрабатываемыми современными методиками расчета.

Теоретические методы расчета создавались по нескольким направлениям. Ученые сделали вывод о возможности количественной оценки сопротивления резанию, исходя из анализа сил, возникающих в плоскости сдвига и на ноже [5]. Дальнейшая разработка этого метода проведена А. М. Холодовым [6], а применительно к процессу копания – В. К. Рудневым [7]. Угол сдвига  $\psi$ , определяющий положение площадки сдвига, по этим методам расчета учитывается либо по формуле И. А. Зворыкина [8], либо принимается как

$$\psi = \frac{\pi}{4} - \frac{\rho}{2}, \quad (1.1)$$

где  $\rho$  – угол внутреннего трения грунта.

По этим формулам угол сдвига не зависит от сцепления грунта, высоты подъема грунта по рабочему органу и других факторов, что не подтверждается экспериментами и является недостатком приведенных выше методов расчета.

Значительный вклад в теорию резания грунтов внес И. Я. Айзеншток [9], использовавший основные положения, разработанные И. А. Зворыкиным применительно к резанию металлов. Процесс резания грунта воспринимали как процесс резания металлов и зарубежные авторы [11].

В. Д. Абезгауз [12] исследовал резание горных пород и грунтов рабочими органами фрезерного типа. Силу резания он предложил определять в зависимости от предела прочности материала при всестороннем сжатии.

Аналогичный подход изложен и в работах М. И. Гальперина [13], исследовавшего резание известняков, и Д. И. Федорова [14].

Нагрузки на рабочий орган землеройной машины формируются непосредственно исходя из закономерностей сопротивления среды, поэтому закономерности механики грунтов применительно к процессу резания использовали уже в [15, 16]. Новым толчком к развитию таких методов расчета послужили фундаментальные работы В. В. Соколовского [17] в области механики грунтов. В работах К. А. Артемьева [18], В. И. Баловнева [19], Ю. А. Ветрова [3] сопротивление резанию отождествлялось с пассивным давлением грунта на подпорную стенку. Несмотря на то, что такие формулы в большинстве случаев дают приемлемые результаты, механика разрушения грунта подпорной стенкой и ножом землеройной машины не тождественна, поэтому существующие различия в работе ножа и подпорной стенки приводят к расхождениям теоретических результатов с экспериментальными данными, что отмечается в [2, 3].

Приведенный обзор, в котором освещаются современные проблемы расчета процесса взаимодействия рабочего оборудования с грунтом, позволяет заключить, что наиболее распространенные методы расчета, основанные на уравнениях пассивного давления грунта на подпорные стенки, как правило, базируются на одной расчетной схеме и не рассматривают альтернативные возможности разрушения грунта. Такие методы не в полной мере учитывают особенности взаимодействия рабочего оборудования с грунтом.

Следовательно, назревает вопрос о необходимости разработки нового подхода к теоретическому обоснованию механизма стружкообразования при взаимодействии рабочих органов землеройно-транспортных машин (ЗТМ) с грунтом в режиме послойной разработки. Основы такой теории могут и должны базироваться на общих положениях механики грунтов, рассматривающих предельное состояние сыпучей среды, обладающей сцеплением, вследствие общности явлений, присущих им. Для создания основ необходимо решить проблему аналитического расчета угла сдвига – ключевого фактора, во многом определяющего условия протекания процессов резания и копания грунта, геометрические и силовые характеристики этих процессов.

В большинстве методик расчета, например, в [3, 7, 19] и многих других, угол сдвига определяется по формуле (1.1). Это объясняется тем,

что такое значение угла по классической теории давления грунта на подпорные стенки определяет положение площадок скольжения для зоны, находящейся в пассивном предельном напряженном состоянии.

И. Г. Иванищев [20] предлагает рассчитывать угол сдвига по формуле

$$\psi = \frac{\pi}{2} - \frac{\alpha + \mu}{2}, \quad (1.2)$$

где  $\alpha$  – угол резания;

$\mu$  – угол трения грунта о нож.

При выводе этой формулы не рассматривались напряжения, действующие по нормали к поверхности сдвига, что ограничивает ее применение.

Угол сдвига, вычисленный по (1.1) и (1.2), является постоянной величиной для данного рабочего органа, а это противоречит экспериментальным исследованиям, показывающим зависимость угла сдвига от многих факторов.

Такие исследования применительно к копанию грунта скрепером проведены А. М. Щемелевым [21]. Им получены результаты (рисунок 1.1), подтверждающие, что по мере заполнения ковша угол сдвига уменьшается, причем наиболее интенсивное уменьшение наблюдается в начальной стадии процесса копания. Физико-механические свойства грунта также влияют на угол сдвига. Так, при одном и том же коэффициенте наполнения с повышением числа ударов  $C$  ударника ДорНИИ угол сдвига увеличивается.

Уменьшение угла сдвига при копании позволило В. И. Баловневу сделать вывод, что «это позволяет рассматривать подсистему «ковш–грунт» как автоматически настраиваемую на преодоление возрастающих по мере заполнения ковша грунтом сопротивлений» [22].

Из зарубежных исследователей наиболее полное описание процесса резания изложено в [23]. Авторы характеризуют процесс резания как процесс, состоящий из двух фаз: отделения разрабатываемого грунта от массива и вытеснения его вдоль ножа или в другом направлении. Однако и в [23] положение площадки сдвига определяется без учета изменения граничных условий на ее поверхности при вытеснении грунта и не рассматриваются возможности появления новых зон деформаций в грунте при перемещении ножа. Хотя в более поздних исследованиях экспе-

риментально установлено, что при надвигании подпорной стенки на грунт при больших ее перемещениях образуется область, в которой грунт деформируется и после появления площадки сдвига.

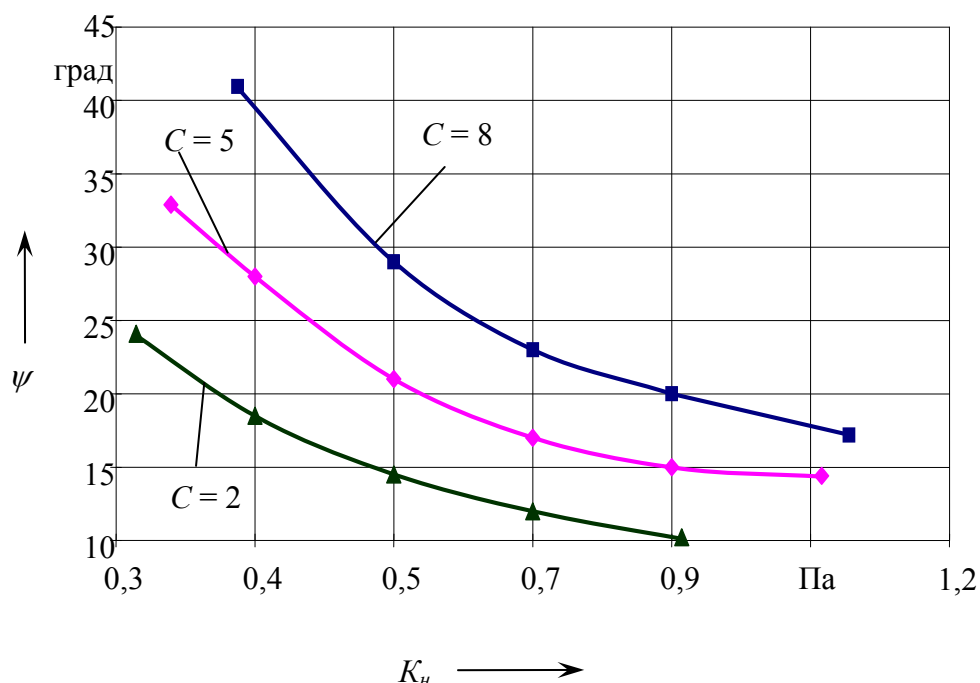


Рисунок 1.1 – Изменение угла сдвига при копании скрепером

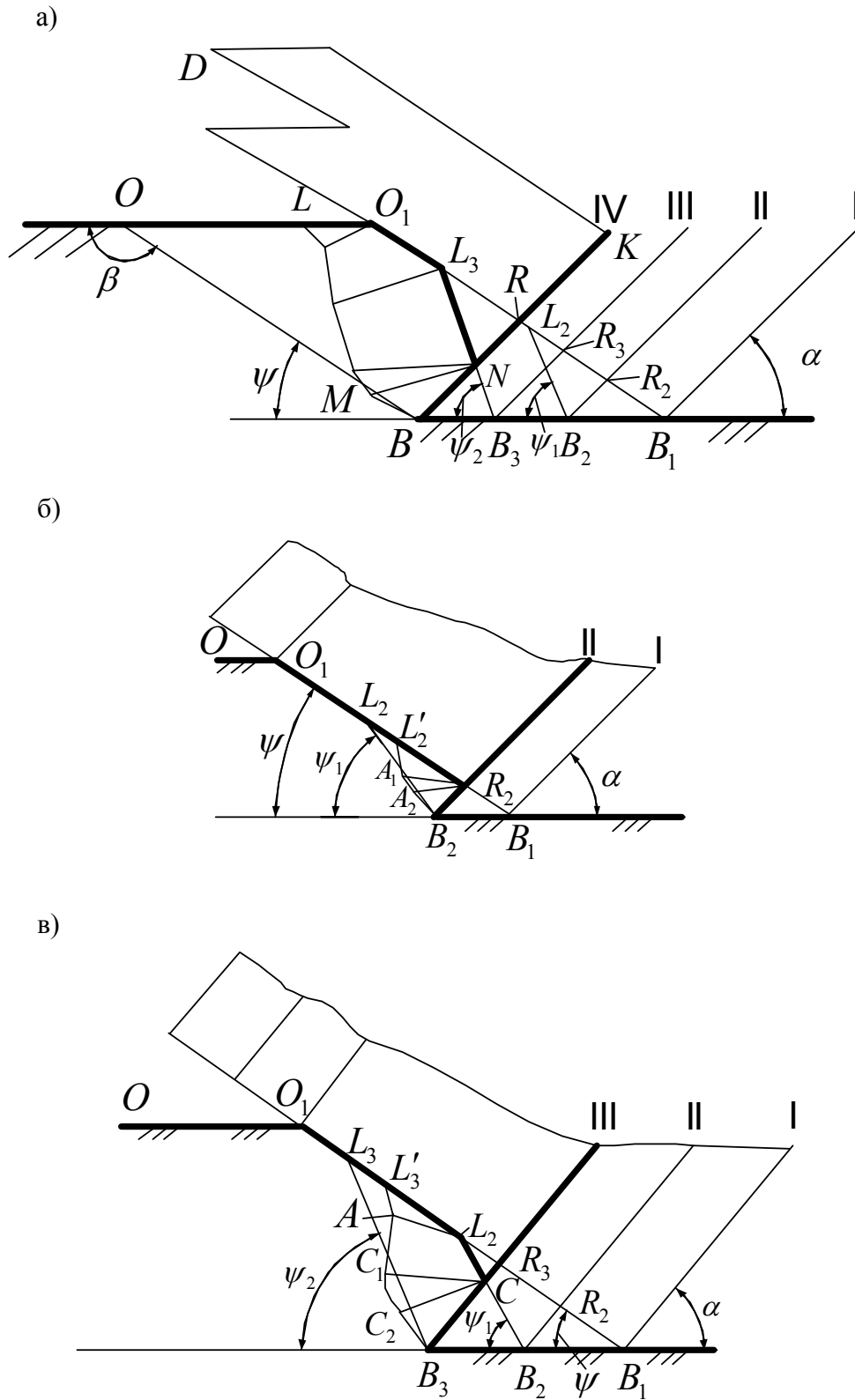
Вопросы возможного дальнейшего разрушения массива грунта после возникновения первичной площадки сдвига при резании в научнотехнической литературе не освещались, они впервые поставлены в [24] и наиболее полно исследованы в [25].

## 1.2 Обоснование механизма разрушения грунта

Резание грунта (рисунок 1.2) представляет собой периодический сдвиг грунта лобовой поверхностью ножа [3, 5, 18, 19, 23, 25]. Предпосылки для обоснования механизма разрушения грунта, изображенного на рисунке, вытекают из анализа физической картины его разрушения и соответствующих теоретических положений.

По мере продвижения ножа из положения I в положение II (см. рисунок 1.2, б) его нижняя часть  $B_2R_2$  образует зону  $A_2R_2B_2$ .





а – при большом сдвиге (общая схема); б – при первом малом сдвиге; в – при последующем малом сдвиге

Рисунок 1.2 – Разрушение грунта при резании

Эта зона подвержена значительным деформациям, и структурные связи между частицами грунта в ней могут быть нарушены в некотором объеме и на соответствующей площадке скольжения  $A_2B_2$  уже при ее появлении, задолго до перемещения ножа в положение II. Такая зона во многих исследованиях [23, 26, 27, 70] описывается как ядро уплотнения.

Вместе с тем, разрушение грунта по площадке  $L'_2A_1A_2B_2$  произойдет только после того, как касательные напряжения достигнут предельных значений на всей ее длине. Поэтому решающим фактором начала первой фазы разрушения является формирование предельного напряженного состояния в зоне  $L'_2R_2A_1$  и на соответствующей площадке  $A_1L'_2$ .

При дальнейшем перемещении ножа изменится давление, действующее на площадку скольжения  $L'_2A_1A_2B_2$ , вследствие вытеснения призмы грунта  $L'_2R_2B_2$ . Установлено [24, 25], что площадка  $L'_2A_1A_2B_2$  имеет наименьшую устойчивость, когда силы трения направлены к ее вершине, а угол отклонения  $\delta$  приведенного давления  $q$ , действующего на нее, равен углу внутреннего трения  $\rho$  грунта. Условие  $\delta = \rho$  выполняется только при предельном напряженном состоянии, т. е. непосредственно в момент сдвига. При этом наибольшее давление будет испытывать участок  $L'_2A_1$ , расположенный под большим углом, а зона разрушения при выполнении условия  $\delta = \rho$  занимает узкий слой вдоль этой площадки.

Следовательно, непосредственно в момент появления первичной площадки скольжения  $L'_2A_1A_2B_2$  возможно разрушение грунта в узком слое, примыкающем к наиболее нагруженному ее участку  $L'_2A_1$ . Этот процесс непрерывно возобновляется в некотором объеме, примыкающем к наиболее крутым и поэтому испытывающим наибольшее давление участкам линии скольжения. Разрушение грунта напоминает как бы его течение, продолжающееся до формирования устойчивой площадки сдвига  $L_2B_2$ . Необходимо иметь в виду, что процесс «течения», в зависимости от типа грунта, может происходить достаточно быстро.

Таким образом, переходной процесс последовательного разрушения грунта (вторая фаза разрушения) после возникновения первоначальной площадки скольжения  $L'_2A_1A_2B_2$  будет продолжаться до тех пор, пока сдвиг не произойдет под углом  $\psi_1$ , обеспечивающим устойчивость массива грунта от дальнейшего разрушения. При этом будет наблюдаться значительное спрямление площадки скольжения за счет перераспределения давлений при разной крутизне ее участков. Следовательно, вновь

сформированную площадку скольжения  $L_2B_2$  можно считать прямой линией.

При дальнейшем продвижении ножа снова происходит малый сдвиг (см. рисунок 1.2, в, положение ножа III). Такой случай является основным и встречается наиболее часто, его описание значительно сложнее, т. к. необходимо рассматривать массив ненарушенной структуры  $O_1L_2CB_3$ , состоящей из трех граней. Непосредственно в момент первичного сдвига грунта по площадке  $L'_3AC_1C_2B_3$  снова наступает процесс «течения» грунта, заканчивающийся образованием устойчивой площадки сдвига  $L_3B_3$ , расположенной под углом  $\psi_2$ . Зона «течения» грунта во второй фазе разрушения может проходить как через область грунта с нарушенной структурой (отрезок  $C_1B_3$ ), так и непосредственно в массиве грунта с ненарушенной структурой (отрезок  $L_3C_1$ ).

Особенностью разрушения грунта при промежуточном сдвиге является и то, что в первичной области разрушения  $L'_3L_2CB_3C_2C_1A$  возможно существование зон с неопредельным напряженным состоянием грунта. Такие явления наблюдались рядом исследователей [10, 25, 27–29] и могут быть объяснены следующим.

Точка  $L_2$  разделяет два откоса  $O_1L_2$  и  $L_2C$  с разными граничными условиями на их поверхностях. Если рассматривать эти откосы отдельно, то откос  $L_2C$  выдерживает большее давление, чем откос  $O_1L_2$ , т. к. имеет больший угол  $\psi_1$  наклона поверхности. Поэтому при выходе возможной огибающей линии скольжения  $L'_3AC_1C_2B_3$  на поверхность откоса  $L_2C$  со стороны ножа  $B_3C$  должно было бы действовать большее разрушающее давление, чем если бы огибающая выходила на менее устойчивую поверхность откоса  $O_1L_2$ . Следовательно, возникновение малого сдвига наиболее вероятно сразу после выхода огибающей линии скольжения  $L'_3AC_1C_2B_3$  на поверхность откоса  $O_1L_2$  слева от точки стыка  $L_2$ .

В итоге структурные связи будут нарушены в зоне  $C_2CB_3$ , примыкающей к ножу, и зоне  $L'_3L_2A$ , примыкающей к откосу  $O_1L_2$ , и в узком слое вдоль огибающей линии скольжения на площадке  $AC_1C_2$ . Большая часть объема зоны  $AL_2CC_1$ , примыкающей к грани  $L_2C$ , будет находиться в неопредельном состоянии.

В положении IV ножа (см. рисунок 1.2, а) образуется новый большой сдвиг по площадке  $LMB$ , после которого снова наступает разрушение

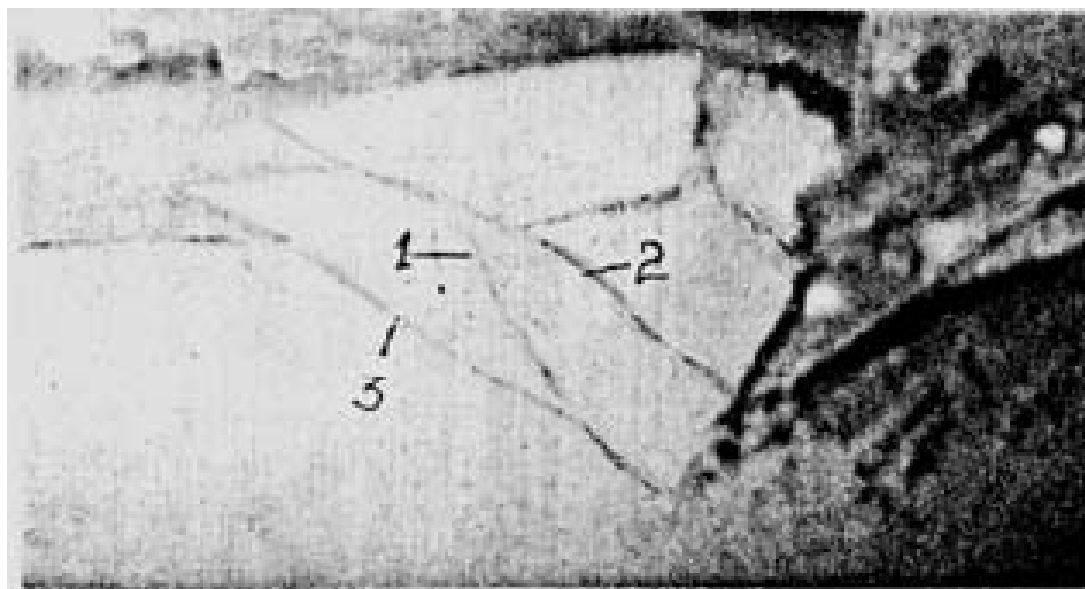
грунта в зонах, примыкающих к наиболее крутому участку  $LM$ , до появления устойчивой площадки  $OB$ , расположенной под углом  $\psi$ .

Таким образом, процесс разрушения грунта состоит из двух фаз: фазы разрушения массива ненарушенной структуры при внедрения ножа и фазы переформирования образовавшейся площадки сдвига при вытеснении разрушенного грунта по поверхности ножа.

Необходимо отметить, что вторая фаза разрушения грунта может начаться при незаконченной первой фазе, т. е. две фазы разрушения могут протекать почти одновременно. Это будет зависеть как от типа грунта и его свойств, так и от условий резания.

Подобные явления применительно к подпорной стенке экспериментально наблюдались и докладывались на XI Международной конференции по механизации земляных и строительных горных работ, состоявшейся в 1982 г. в Будапеште, а выводы о необходимости учета двух расчетных фаз при резании грунта были сформулированы позже (в [23]), хотя эта задача и не была решена.

Аналогичные результаты получены авторами на установке Ю. А. Ветрова (рисунок 1.3).



1, 2, 3 – площадки скольжения

Рисунок 1.3 – Формирование площадок скольжения

На рисунке зафиксирован переход от первой фазы разрушения грунта ко второй, заканчивающейся формированием новой площадки большого сдвига. Первичная площадка скольжения 1 выходит на площадку скольжения 2 предыдущего большого сдвига, и при последующем незначительном перемещении ножа сразу же наступает вторая фаза разрушения, при которой образуется площадка скольжения 3 нового большого сдвига.

Снимок получен на установке Ю. А. Ветрова, передняя сторона грунтового канала которой выполнена из стекла. Для своего времени это был уникальный снимок, т. к. визуально заметить площадки скольжения в грунте достаточно сложно, за исключением площадки скольжения при большом сдвиге. Позже [30] был разработан метод, позволяющий достаточно подробно и четко рассмотреть картину формирования больших и малых сдвигов при разрушении грунта ножом. Метод достаточно прост и заключается в изменении частоты кадров при просмотре экспериментальных видеозаписей. Такой просмотр подтвердил правомерность сделанных предпосылок о физической картине формирования сдвигов грунта при резании и копании.

Для оценки взаимодействия рабочего органа с потоком грунта, перемещаемым по нему, достаточно рассмотреть процесс при большом сдвиге, т. к. именно при нем формируются размеры грунтового потока, а следовательно, и все основные факторы, характеризующие это взаимодействие. Если необходимо получить амплитудно-частотную характеристику нагруженности рабочего органа, следует рассматривать как большие, так и малые сдвиги. В монографии рассмотрены задачи первого типа.

### ***1.3 Плоское предельное равновесие сыпучей среды***

Разработанные В. В. Соколовским [17] положения теории предельного равновесия сыпучей среды, обладающей сцеплением, позволяют решать многие задачи. Дифференциальные уравнения

$$\frac{\partial \sigma_x}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial y} = 0; \quad \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial x} + \frac{\partial \sigma_y}{\partial y} = \rho_s g \quad (1.3)$$

являются основными уравнениями плоского равновесия.

Соппротивление сдвигу характеризуется уравнением Кулона

$$\tau = \sigma \operatorname{tg} \rho + c, \quad (1.4)$$

где  $\tau$  и  $\sigma$  – касательная и нормальная составляющие напряжения на площадке сдвига;

$c$  – удельное сцепление грунта.

Плоское напряженное состояние сыпучей среды представлено на диаграмме Мора (рисунок 1.4).

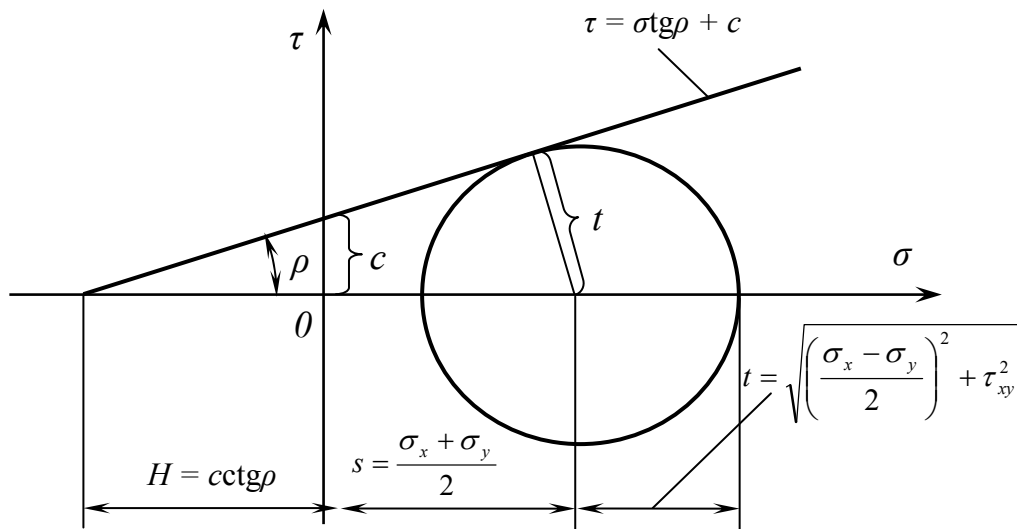


Рисунок 1.4 – Диаграмма напряжений Мора

Предельное условие для точки  $P$

$$t = (S + H) \sin \rho$$

может быть записано в виде

$$\frac{1}{4} (\sigma_x - \sigma_y)^2 + \tau_{xy}^2 = \frac{\sin^2 \rho}{4} (\sigma_x + \sigma_y + 2H)^2, \quad (1.5)$$

где  $H$  – давление связности,

$$H = c \operatorname{ctg} \rho. \quad (1.6)$$

Система из (1.3) и (1.5) содержит три неизвестных составляющих напряжения  $\sigma_x$ ,  $\sigma_y$  и  $\tau_{xy}$ . Поэтому задача о нахождении этих составляющих напряжения при известных граничных условиях статически определима и может быть решена при помощи статических уравнений без привлечения кинематических отношений. Эта задача сводится к определению функциональной зависимости между граничными условиями и свойствами грунта в состоянии предельного равновесия.

Зависимости, связывающие приведенное давление  $p$ , действующее на границе рассматриваемой области, и угол его отклонения  $\delta$  с компонентами  $\sigma$  и  $\varphi$ , характеризующими напряженное состояние грунта, имеют следующий вид:

$$\varphi = (1 - \chi) \frac{\pi}{4} + \frac{1}{2} (\chi \Delta - \delta) + m\pi; \quad \sigma = p \frac{\sin \Delta}{\sin(\Delta - \chi\delta)}, \quad (1.7)$$

где  $\varphi$  – угол между направлением наибольшего главного напряжения  $\sigma_{\max}$  в данной точке и поверхностью рассматриваемой зоны или осью  $X$  (рисунок 1.5) при их совпадении;

$\chi = \pm 1$  (знак «плюс» – при пассивном напряженном состоянии, «минус» – при активном);

$m$  – целое число, не оказывающее влияния на вычисления;

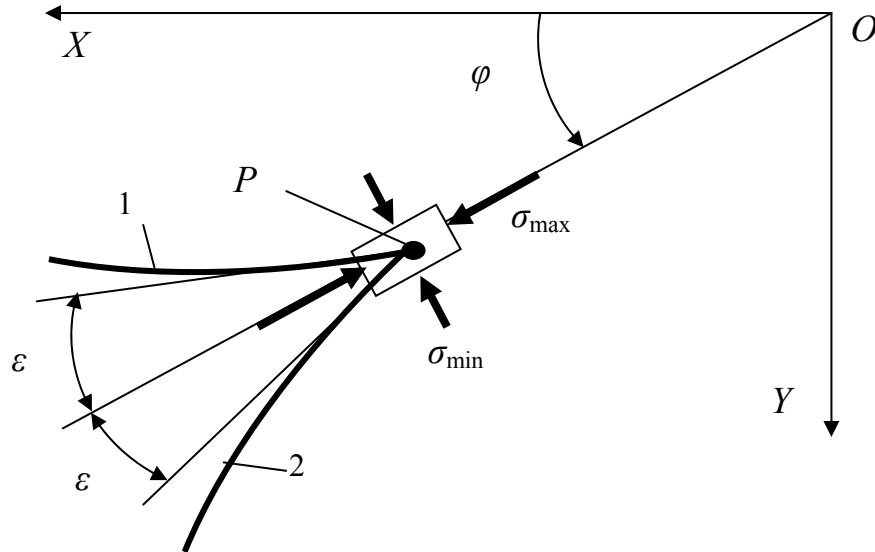
$\sigma$  – среднее приведенное нормальное напряжение,

$$\sigma = \frac{(\sigma_x + \sigma_y)}{2} + H.$$

Углы  $\delta$  и  $\Delta$  связаны зависимостью

$$\sin \Delta = \frac{\sin \delta}{\sin \rho}, \quad \text{причем } |\Delta| \leq \pi/2. \quad (1.8)$$

Известные значения  $\sigma$  и  $\varphi$  для точки в грунтовом массиве, находящейся в предельном равновесии и имеющей координаты  $X$  и  $Y$ , несут всю существенную информацию относительно напряженного состояния в этой точке.



1, 2 – линии скольжения

Рисунок 1.5 – Семейство линий скольжения на плоскости  $XY$

В. В. Соколовский преобразует систему уравнений (1.3) и (1.5):

$$\left[ \frac{\partial \sigma}{\partial x} \mp 2\sigma \operatorname{tg} \rho \frac{\partial \varphi}{\partial x} \mp \rho_2 g \operatorname{tg} \rho \right] \cos(\varphi \mp \varepsilon) + \left[ \frac{\partial \sigma}{\partial y} \mp 2\sigma \operatorname{tg} \rho \frac{\partial \varphi}{\partial y} - \rho_2 g \right] \sin(\varphi \mp \varepsilon) = 0,$$

где  $\varepsilon$  – угол наклона линий скольжения к направлению  $\sigma_{\max}$  (см. рисунок 1.4),

$$\varepsilon = \frac{\pi}{4} - \frac{\rho}{2}. \quad (1.9)$$

Решение сводится к нахождению  $\sigma$  и  $\varphi$ , удовлетворяющих уравнениям равновесия и граничным условиям задачи.

Используя метод вывода уравнений, предложенный С. А. Христиановичем [31] в гидравлике, В. В. Соколовский [17] устанавливает их форму:

$$\begin{aligned} dy &= dx \operatorname{tg}(\varphi \mp \varepsilon); \\ d\sigma \mp 2\sigma \operatorname{tg} \rho d\varphi &= \rho_2 g (dy \mp \operatorname{tg} \rho dx). \end{aligned}$$

Таким образом, основная система уравнений имеет два действительных различных семейства характеристик и принадлежит к гипербо-



лическому типу. Так как характеристики наклонены к оси  $X$  под углами  $\varphi \pm \varepsilon$ , то они являются линиями скольжения на плоскости  $XU$ .

Для невесомой среды, когда  $\rho_z = 0$ , уравнения характеристик упрощаются:

$$\begin{aligned} dy &= dx \operatorname{tg}(\varphi \mp \varepsilon); \\ d\sigma \mp 2\sigma \operatorname{tg}\rho d\varphi &= 0. \end{aligned}$$

После введения новой, предложенной В. В. Соколовским функции

$$\chi = \frac{c \operatorname{tg}\rho}{2} \ln \frac{\sigma}{c} \quad (1.10)$$

эти уравнения могут быть проинтегрированы:

$$\chi \mp \varphi = \operatorname{const}. \quad (1.11)$$

Канонические уравнения для этого случая:

$$\begin{aligned} \frac{\partial y}{\partial \xi} = \frac{\partial x}{\partial \xi} \operatorname{tg}(\varphi - \varepsilon); & \quad \frac{\partial y}{\partial \eta} = \frac{\partial x}{\partial \eta} \operatorname{tg}(\varphi + \varepsilon); \\ \frac{\partial \sigma}{\partial \xi} - 2\sigma \operatorname{tg}\rho \frac{\partial \varphi}{\partial \xi} = 0; & \quad \frac{\partial \sigma}{\partial \eta} + 2\sigma \operatorname{tg}\rho \frac{\partial \varphi}{\partial \eta} = 0, \end{aligned}$$

где

$$\xi = \chi + \varphi; \quad \eta = \chi - \varphi. \quad (1.12)$$

Такой выбор независимых переменных законен, если  $\xi$  и  $\eta$  – переменные. В противном случае существуют частные решения, которые широко используются при решении задач для невесомой среды.

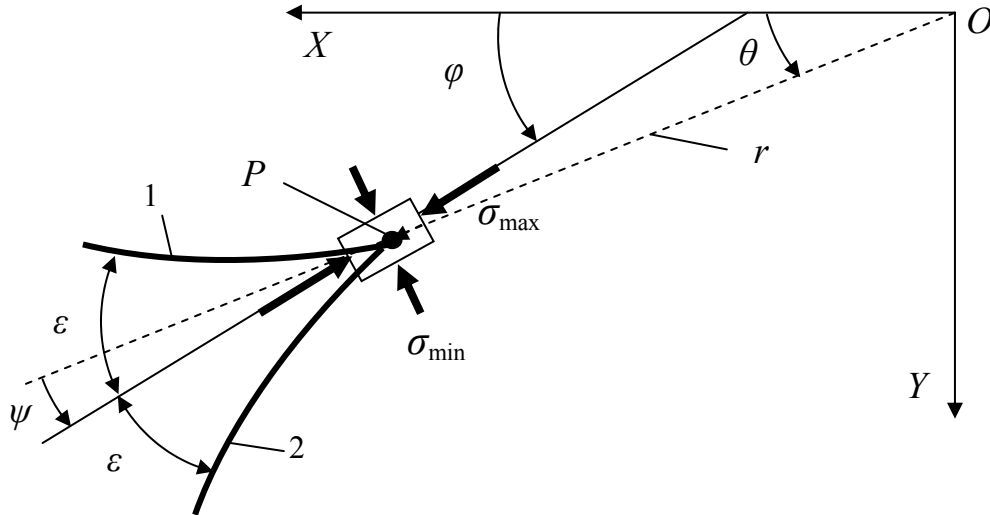
Если  $\xi$  постоянно, то  $\varphi$  есть функция только одной переменной  $\eta$ . Если прямые характеристики проходят через точку  $O$ , составляя пучок, то удобно вводить полярные координаты  $r, \theta$  с полюсом в той же точке  $O$  (рисунок 1.6).

Тогда решения имеют вид:

$$\sigma = C \exp(-2\varphi \operatorname{tg}\rho); \quad \varphi = \theta + \varepsilon,$$

где  $C$  – произвольная постоянная, определяемая через значения  $\sigma$  и  $\varphi$  в области с известными граничными условиями;

$\theta$  – угловая полярная координата луча в переходной области с полюсом в точке  $O$ .



1, 2 – линии скольжения

Рисунок 1.6 – Семейство линий скольжения

Кривые характеристики представляют собой логарифмические спирали, которые с увеличением угла  $\theta$  удаляются от точки  $O$ :

$$r \exp(-\theta \operatorname{tg} \rho) = \text{const}.$$

Если  $\eta$  постоянно, а  $\xi$  переменен, то при тех же условиях

$$\sigma = D \exp(2\varphi \operatorname{tg} \rho); \quad \varphi = \theta - \varepsilon, \quad (1.13)$$

где  $D$  – произвольная постоянная, определяемая через значения  $\sigma$  и  $\varphi$  в области с известными граничными условиями.

Кривые характеристики теперь являются логарифмическими спиралями

$$r \exp(\theta \operatorname{tg} \rho) = \text{const}, \quad (1.14)$$

приближающимися к точке  $O$  с увеличением угла  $\theta$ .

Если  $\zeta$  и  $\eta$  постоянны, то  $\sigma$  и  $\varphi$  также постоянны, а характеристики образуют на плоскости  $XU$  две изогональные системы параллельных прямых.

Частные решения позволяют решать многие задачи, в которых рассматривается предельное состояние грунтовых массивов невесомой сыпучей среды, обладающей сцеплением.

#### **1.4 Расчет угла сдвига**

Непосредственно в момент разрушения грунта при предельном равновесии на площадках скольжения, появляющихся в зонах разрушения, выполняется условие (1.4). Это условие справедливо и для огибающей  $LMB$  линий скольжения [17], т. е. угол отклонения приведенных давлений, действующих на участках огибающей, будет равен углу внутреннего трения ( $\delta_{LMB} = \rho$ ).

Анализ разрушающих давлений, действующих на откос, показывает, что наиболее опасным с точки зрения устойчивости грунта является действие на него приведенных давлений, имеющих угол отклонения  $\delta = \rho$ . Это видно из рисунка 1.7, где представлены результаты расчетов для частного случая в относительных единицах. Для всех трех расчетных схем разрушающее давление будет минимальным при его отклонении на угол  $\rho$ .

При выполнении условия  $\delta = \rho$  размеры всей области предельного состояния, примыкающей к откосу  $A_0OB$ , будут минимальны, а угол при вершине откоса  $\beta$  и угол сдвига  $\psi$  будут связаны зависимостью  $\psi = \pi - \beta$  (рисунок 1.8).

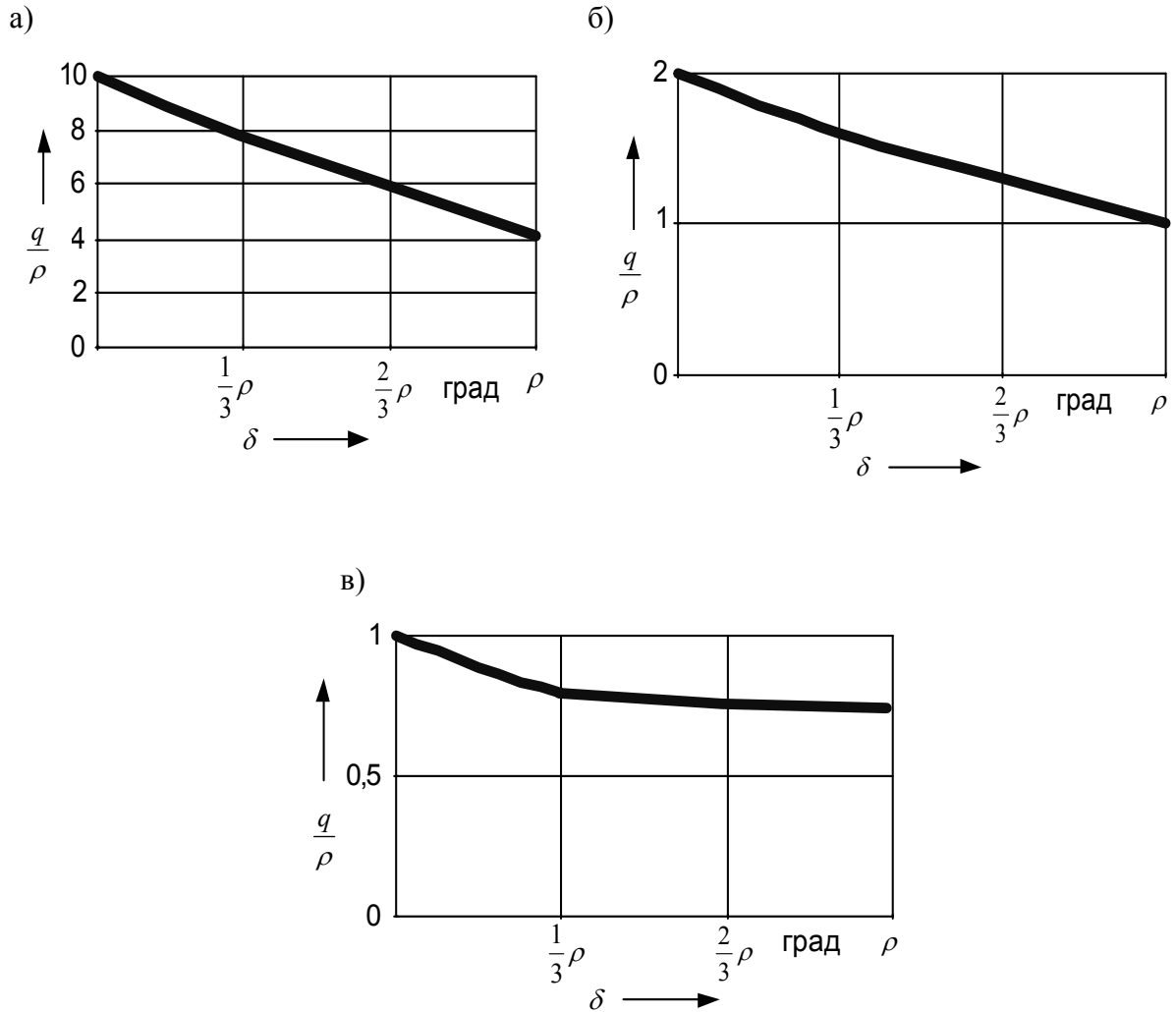
Поскольку условие  $\delta = \rho$  выполняется только при сдвиге (предельном равновесии), то и устойчивость откоса ненарушенной структуры будет критической непосредственно в момент сдвига по огибающей  $LMB$  (см. рисунок 1.2, а).

Методика определения угла сдвига  $\psi$  представлена далее.

На рисунке 1.9 приведены система координат и положительные направления используемых в дальнейшем углов (в соответствии с их аналогами в работе В. В. Соколовского [17]).

На рисунке приняты следующие обозначения:  $p$ ,  $\delta_1$  – приведенное давление, действующее на поверхность грунта  $A_0O$ , и угол его отклонения от нормали к этой поверхности;  $q$ ,  $\delta$  – приведенное давление, действующее на откос  $OB$ , и угол его отклонения от нормали к этому откосу;  $\varphi_1$  – угол

наклона наибольших главных напряжений в зоне, примыкающей к поверхности грунта, относительно оси  $X$ ;  $\bar{\varphi}_2$  и  $\varphi_2$  – углы наклона наибольших главных напряжений в зоне, примыкающей к откосу, относительно откоса и оси  $X$  соответственно;  $\beta$  – угол при вершине откоса.



а – для решений с сингулярной точкой; б – для решений с линией разрыва; в – при непрерывном распределении напряжений

Рисунок 1.7 – Влияние угла отклонения на величину предельного давления

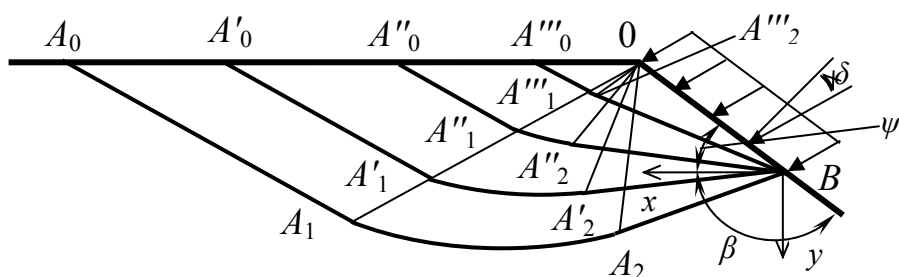


Рисунок 1.8 – Влияние угла отклонения приведенного давления на размеры зон разрушения грунта

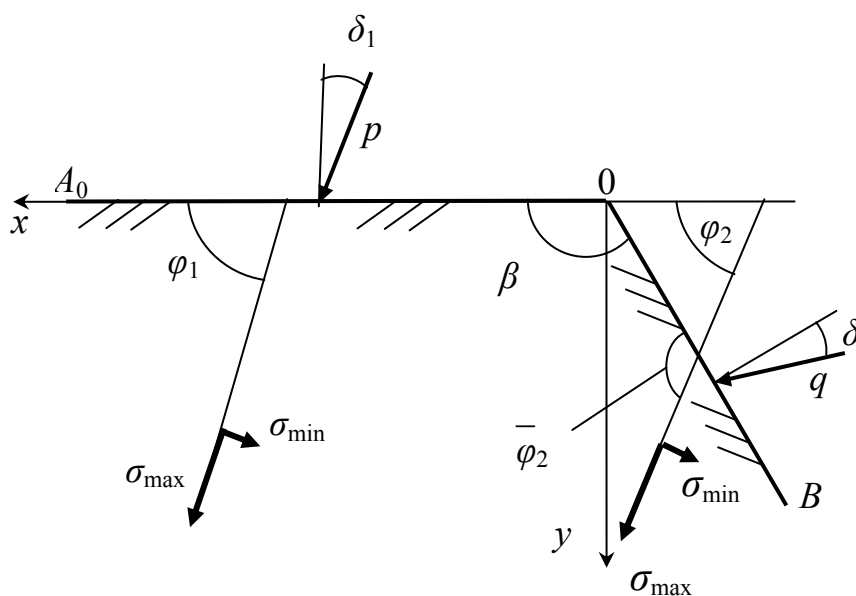


Рисунок 1.9 – Положительные направления углов

Давление, действующее на откос, приводит к выпиранию грунта на поверхности. Грунт в зоне, примыкающей к откосу, в таком случае находится в активном напряженном состоянии, а в зоне, примыкающей к поверхности, – в пассивном.

Уравнения, характеризующие напряженное состояние грунта в этих зонах, согласно уравнениям (1.7) будут иметь следующий вид:

– для пассивной зоны, примыкающей к поверхности грунта, при  $\chi = +1$

$$\sigma_1 = p \frac{\sin \Delta_1}{\sin(\Delta_1 - \delta_1)}; \quad \varphi_1 = \frac{1}{2} (\Delta_1 - \delta_1); \quad (1.15)$$

– для активной зоны, примыкающей к откосу, при  $\chi = -1$

$$\sigma_2 = q \frac{\sin \Delta}{\sin(\Delta + \delta)}; \quad \bar{\varphi}_2 = \frac{\pi}{2} - \frac{1}{2} (\Delta + \delta);$$

$$\varphi_2 = \bar{\varphi}_2 - (\pi - \beta) = \beta - \frac{\pi}{2} - \frac{1}{2} (\Delta + \delta), \quad (1.16)$$

где  $\sigma_1$  и  $\sigma_2$  – средние приведенные нормальные напряжения в зонах, примыкающих к поверхности грунта и откосу соответственно.

Углы  $\Delta_1$  и  $\Delta$  согласно уравнению (1.8) определяются как

$$\Delta_1 = \arcsin \frac{\sin \delta_1}{\sin p}; \quad \Delta = \arcsin \frac{\sin \delta}{\sin p}.$$

Поскольку откос рассматривается в момент сдвига, то применительно к рассматриваемой задаче при условии  $\delta = \rho$  и  $\Delta = \pi/2$  уравнения (1.16) преобразуются:

$$\sigma_2 = \frac{q}{\cos \rho}; \quad \bar{\varphi}_2 = \frac{\pi}{4} - \frac{\rho}{2} = \varepsilon;$$

$$\varphi_2 = \bar{\varphi}_2 - (\pi - \beta) = \beta - \frac{3}{4} \pi - \frac{\rho}{2}. \quad (1.17)$$

Это значит, что в момент сдвига грунта линии скольжения в зоне, примыкающей к откосу, представляют собой две изогональные системы параллельных прямых, одна из которых совпадает с поверхностью откоса, а вторая наклонена к нему под углом  $2\varepsilon$ .

**Решения с сингулярной точкой при вершине откоса.** Сингулярной считается точка, в которой пересекается пучок линий скольжения. С точки зрения физики это локализация условия разрушения или нарушение непрерывности напряжений в этой точке [17].

Расчетная схема для решения с сингулярной точкой при вершине откоса представлена на рисунке 1.10. Схема изображена при угле  $\delta < \rho$  ввиду невозможности при угле  $\delta = \rho$  изображения площадок скольжения, параллельных огибающей  $A_2B$ , поскольку они совпадают с поверхностью откоса.

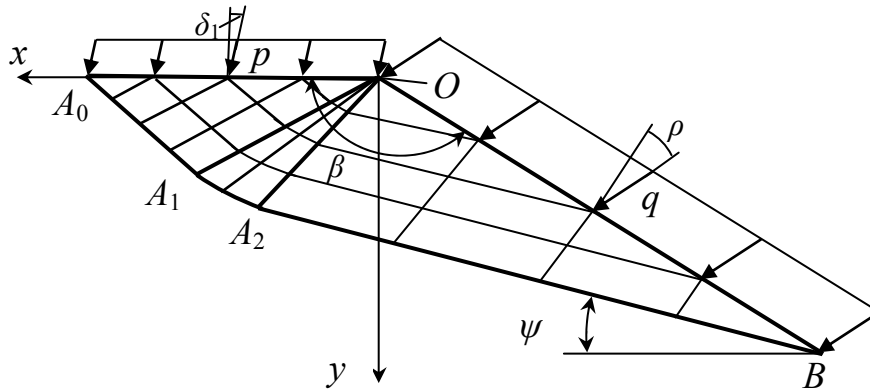


Рисунок 1.10 – Расчетная схема с сингулярной точкой

Для рассматриваемой схемы значение  $\sigma = \sigma_2$  в точке  $O$ , принадлежащей зоне  $A_2OB$ , примыкающей к откосу, должно быть больше, чем значение  $\sigma = \sigma_1$  в точке  $O$ , принадлежащей зоне  $A_0OA_1$ , примыкающей к поверхности грунта, т. е.  $\sigma_2 \geq \sigma_1$ . В это неравенство подставляются соответствующие значения из (1.15) и (1.17), определяются ограничения на величину давления на откос, обеспечивающие существование рассматриваемого расчетного случая с сингулярной точкой:

$$q \geq p \frac{\sin \Delta_1}{\sin(\Delta_1 - \delta_1)} \cos \rho. \quad (1.18)$$

Для характеристик, проходящих через точку  $O$  зоны  $A_1OA_2$ ,

$$\eta_1 = \eta_2 = \chi - \varphi = \text{const.}$$

Для точки  $O$ , принадлежащей зоне  $A_0OA_1$ , с учетом (1.10) и (1.15)

$$\eta_1 = \frac{\operatorname{ctg}\rho}{2} \ln \frac{p}{c} \frac{\sin \Delta_1}{\sin(\Delta_1 - \delta_1)} - \frac{1}{2}(\Delta_1 - \delta_1), \quad (1.19)$$

а для точки  $O$ , расположенной в зоне  $A_2OB$ , с учетом  $\sigma_2$  и  $\varphi_2$  согласно уравнениям (1.17)

$$\eta_2 = \frac{\operatorname{ctg}\rho}{2} \ln \frac{q}{c} \cdot \frac{1}{\cos \rho} - \beta + \frac{3}{4}\pi + \frac{\rho}{2}. \quad (1.20)$$

Так как  $\eta_1 = \eta_2$ , то

$$\beta = \frac{\operatorname{ctg}\rho}{2} \ln \frac{q}{p} \cdot \frac{\sin(\Delta_1 - \delta_1)}{\sin \Delta_1 \cos \rho} + \frac{3}{4}\pi + \frac{\rho}{2} + \frac{1}{2}(\Delta_1 - \delta_1). \quad (1.21)$$

Тогда

$$A = \frac{q \sin(\Delta_1 - \delta_1)}{p \sin \Delta_1 \cos \rho}. \quad (1.22)$$

Далее рассматривается угол сдвига  $\psi$ . Так как при  $\delta = \rho$   $\psi = \pi - \beta$ , то

$$\psi = \frac{\pi}{4} - \frac{\rho}{2} - \frac{1}{2}(\Delta_1 - \delta_1) - \frac{\operatorname{ctg}\rho}{2} \ln A. \quad (1.23)$$

Уравнение (1.23) позволяет получить величину угла сдвига при выполнении неравенства (1.18) по известным граничным условиям на поверхности грунта (приведенное давление  $p$  и угол его отклонения  $\delta_1$ ) и откосе (приведенное давление  $q$ , имеющее угол отклонения  $\rho$ ).

**Разрывные решения.** Если условие (1.18) не будет выполнено, то в зоне разрушения образуется линия разрыва  $OA$ , вблизи которой хотя и сохраняется равновесие, но нет полной непрерывности напряжений. Расчетная схема для такого случая изображена на рисунке 1.11.

Для зоны  $A_0OA$  будут справедливы уравнения (1.15). Для этой же зоны из уравнений (1.7) при  $\chi = +1$  относительно линии разрыва  $OA$

$$\bar{\varphi}_+ = \frac{1}{2}(\Delta_p - \delta_p),$$



где  $\bar{\varphi}_+$  – угол наклона главных напряжений в зоне  $A_0OA$  относительно линии разрыва  $OA$ ;

$\delta_p$  – угол отклонения приведенного давления на линии разрыва.

$$\Delta_p = \arcsin \frac{\sin \delta_p}{\sin \rho}. \quad (1.24)$$

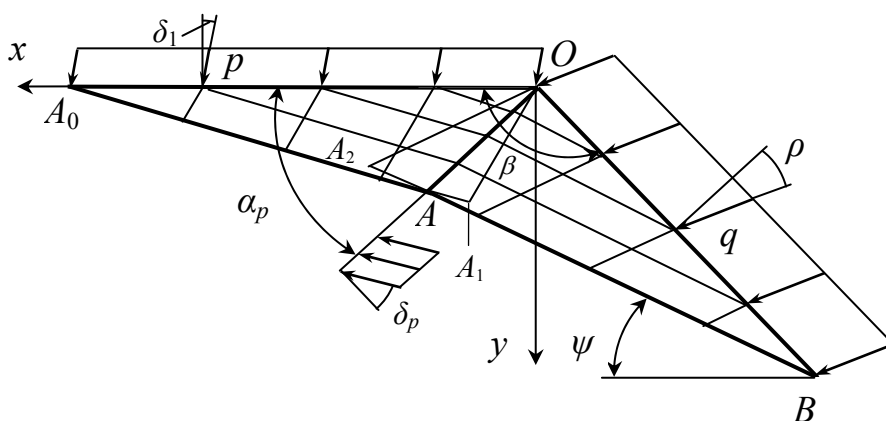


Рисунок 1.11 – Расчетная схема с линией разрыва

Полученное значение  $\bar{\varphi}_+$  приводится к оси  $X$ :

$$\varphi_+ = \bar{\varphi}_+ + \alpha_p = \alpha_p + \frac{1}{2}(\Delta_p - \delta_p), \quad (1.25)$$

где  $\alpha_p$  – угол наклона линии разрыва.

Но для одной и той же зоны угол наклона главных напряжений может иметь одно значение, вследствие этого  $\varphi_1$  должно быть равно  $\varphi_+$ . Тогда с учетом их значений по (1.15) и (1.25)

$$\alpha_p = \frac{1}{2}(\Delta_1 - \delta_1) - \frac{1}{2}(\Delta_p - \delta_p). \quad (1.26)$$

Аналогичным образом рассматривается зона  $AOB$ . Для нее, с одной стороны, справедливы уравнения (1.17), а с другой – относительно линии разрыва из (1.7) при  $\chi = -1$

$$\bar{\varphi}_- = \frac{\pi}{2} - \frac{1}{2}(\Delta_p + \delta_p),$$

где  $\bar{\varphi}_-$  – угол наклона главных напряжений в зоне  $AOB$  относительно линии разрыва  $OA$ .

Полученное значение  $\bar{\varphi}_-$  приводится к оси  $X$ :

$$\varphi_- = \bar{\varphi}_- - (\pi - \alpha_p) = \alpha_p - \frac{\pi}{2} - \frac{1}{2}(\Delta_p + \delta_p).$$

В это уравнение подставляется значение  $\alpha_p$  из (1.26). Тогда

$$\varphi_- = \frac{1}{2}(\Delta_1 - \delta_1) - \frac{\pi}{2} - \Delta_p.$$

Данное уравнение, справедливое для зоны  $AOB$ , приравнивается к (1.17), также справедливому для этой зоны. Отсюда

$$\beta = \frac{\pi}{4} + \frac{\rho}{2} + \frac{1}{2}(\Delta_1 - \delta_1) - \Delta_p.$$

Так как  $\psi = \pi - \beta$  (при  $\delta = \rho$ ), то

$$\psi = \frac{3}{4}\pi - \frac{\rho}{2} - \frac{1}{2}(\Delta_1 - \delta_1) + \Delta_p. \quad (1.27)$$

Из этого уравнения видно, что для определения угла сдвига  $\psi$ , кроме граничных условий на поверхности грунта и откосе, необходимо знать угол  $\Delta_p$ . Величина этого угла рассчитывается следующим образом. Условия разрыва могут быть получены из уравнений (1.7) при  $\chi = \pm 1$  (знак «плюс» – для зоны  $A_0OA$ , «минус» – для зоны  $AOB$ ):

$$\frac{\sigma_+}{\sigma_-} = \frac{\sin(\Delta_p + \delta_p)}{\sin(\Delta_p - \delta_p)}, \quad (1.28)$$

где  $\sigma_+$ ,  $\sigma_-$  – средние приведенные нормальные напряжения в зонах  $A_0OA$  и  $AOB$ , примыкающих к поверхности грунта и откосу соответственно, выраженные через углы  $\delta_p$  и  $\Delta_p$  на линии разрыва.

Из условий разрыва (1.28) с учетом того, что  $\sigma_+ = \sigma_1$ , а  $\sigma_- = \sigma_2$ , согласно (1.15) и (1.17)

$$\frac{\sin(\Delta_p + \delta_p)}{\sin(\Delta_p - \delta_p)} = \frac{p \sin \Delta_1 \cos \rho}{q \sin(\Delta_1 - \delta_1)}$$

Это уравнение преобразуется с учетом значения  $A$  по (1.22):

$$\frac{\sin(\Delta_p - \delta_p)}{\sin(\Delta_p + \delta_p)} = A, \quad (1.29)$$

а его решение после ряда преобразований [22] с учетом того, что

$$\frac{\sin(\Delta_p - \delta_p)}{\sin(\Delta_p + \delta_p)} = \frac{\cos \delta_p - \sqrt{\cos^2 \delta_p - \cos^2 \rho}}{\cos \delta_p + \sqrt{\cos^2 \delta_p - \cos^2 \rho}},$$

запишется в виде

$$\delta_p = \pm \arccos \left[ \frac{\cos \rho (1 + A)}{2 \sqrt{A}} \right]. \quad (1.30)$$

Далее (1.24) позволяет получить необходимое для определения угла сдвига (см. уравнение (1.27)) значение угла  $\Delta_p$  на линии разрыва.

Из (1.30) видно, что при каком-то фиксированном значении приведенного давления  $q$ , действующего на откос, угол отклонения приведенного давления на линии разрыва  $\delta_p$  может в принятой системе координат и принятом положительном направлении измерения углов иметь два значения – отрицательное и положительное. Однако анализ уравнений показывает, что во всех расчетных случаях следует принимать его значение со знаком «минус». Это следует из расчетной схемы, приведенной на рисунке 1.2. Действительно, при надвигании ножа на грунт, давление, действующее на откос, будет различным для разных значений угла сдвига  $\psi$ . При этом меньшим значениям угла сдвига

соответствует меньшее давление. По этой причине не существует в данный момент двух разных по величине углов сдвига при одинаковых граничных условиях, поскольку площадки сдвига будут испытывать разное по величине давление.

Необходимо отметить, что при выполнении условия  $\delta_1 < 0$  может возникнуть новый тип решений – при непрерывном распределении напряжений с активной зоной. Такой расчетный случай возникает, когда линия разрыва выходит на поверхность грунта и остается одна активная зона  $AOB$ , что возможно лишь при  $\delta_1 < 0$ .

При резании и копании грунта традиционными рабочими органами на поверхности грунта выполняется условие  $\delta_1 \geq 0$  ( $\delta_1 = 0$  при отсутствии призмы волочения и  $\delta_1 > 0$  при ее наличии). Поэтому этот тип решений при непрерывном распределении напряжений с активной зоной, существующих при  $\delta_1 < 0$ , может применяться лишь в специфических расчетных случаях, например, при использовании подгребающих заслонок, элеваторов и иных устройств, обеспечивающих проталкивание грунта в ковш скрепера, когда силы трения перемещаемого по поверхности грунта направлены в сторону ножа.

При отсутствии призмы волочения метод расчета угла сдвига значительно упрощается.

Удерживающее давление, действующее на засыпку, будет численно равно давлению связности, нормальному к поверхности грунта:

$$p = H = c / \operatorname{tg} p.$$

Для такого случая  $\delta_1 = 0$  и  $\Delta_1 = 0$ , а также

$$\lim_{\delta_1 \rightarrow 0} \frac{\sin \Delta_1}{\sin(\Delta_1 \pm \delta_1)} = \frac{1}{1 \pm \sin p}. \quad (1.31)$$

Критическая величина давления, разделяющая два типа решений, а также уравнения, позволяющие определить угол сдвига, несколько преобразуются за счет изменения значений  $\sigma$  и  $\varphi$ , характеризующих пассивное напряженное состояние грунта в зоне  $A_0OA_1$ .

Так, для этой области из (1.15) с учетом вышеизложенного следует, что

$$\sigma = \frac{H}{1 - \sin \rho}; \varphi = 0.$$

Неравенство (1.18), разделяющее эти типы решений, изменится:

$$q \geq H \frac{\cos \rho}{1 - \sin \rho}. \quad (1.32)$$

Расчетный угол сдвига для решений с сингулярной точкой определится по формуле

$$\psi = \frac{\pi}{4} - \frac{\rho}{2} - \frac{\operatorname{ctg} \rho}{2} \ln A, \quad (1.33)$$

где

$$A = \frac{q}{H} \cdot \frac{1 - \sin \rho}{\cos \rho}. \quad (1.34)$$

Если (1.32) не выполняется, то существуют разрывные решения, для которых

$$\psi = \frac{3\pi}{4} - \frac{\rho}{2} + \Delta\rho. \quad (1.35)$$

Значение  $\Delta\rho$  определяется с помощью (1.30), но с учетом значения  $A$ , полученного по (1.34).

Таким образом, разработанный аналитический метод расчета угла сдвига по граничным условиям, базирующийся на теоретических положениях механики сыпучей среды, позволяет решать прикладные задачи при расчетах взаимодействия оборудования землеройно-транспортных машин с грунтом. Для использования метода необходимо знать приведенное давление, угол его отклонения на удерживающей поверхности грунта и величину разрушающего давления на площадке сдвига.

### ***Выводы***

В разделе обоснованы новые представления о механизме разрушения грунта при резании как о процессе, состоящем из двух фаз: фазы первичного разрушения грунта при внедрении ножа и фазы последующего разрушения, при котором происходит переформирование площадки сдвига.

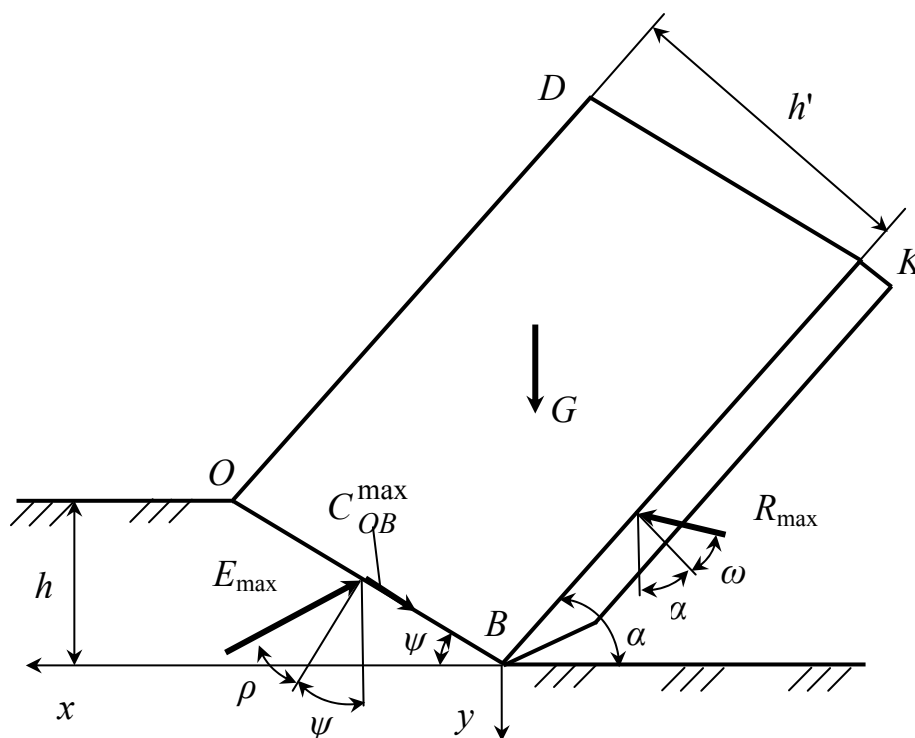
Изложен метод расчета угла сдвига, базирующийся на закономерностях механики грунтов, позволяющий перейти к методам, обеспечивающим расчет не только силовых, но и геометрических, а следовательно, и всех параметров, доступных инструментальному контролю при исследованиях взаимодействия оборудования землеройных машин с грунтом.

## 2 Сопротивление грунта резанию плоским рабочим органом

### 2.1 Сопротивление грунта резанию при отсутствии призмы волочения

Расчетная схема резания грунта при отсутствии призмы волочения, представленная на рисунке 2.1, отображает процесс резания с элементной или ступенчатой стружкой, т. е. при разрушении грунта за счет сдвига, что характерно для большинства грунтов и типов рабочего оборудования.

а)



б)

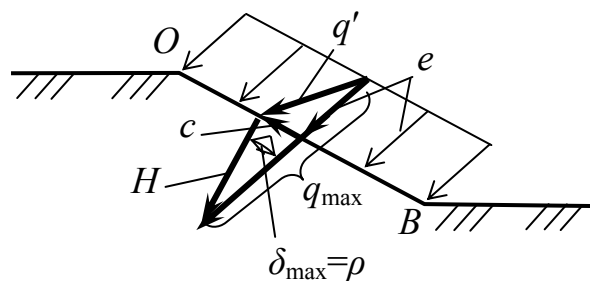


Рисунок 2.1 – Схема резания грунта при большом сдвиге (а) и схема сил, действующих на площадку большого сдвига (б)

Рассматривается установившийся процесс резания грунта ножом с острой режущей кромкой, при котором объем призмы грунта  $OBKD$ , находящейся на ноже, будет постоянным.

В [1, 32, 33] отмечено некоторое увеличение сопротивления резанию при увеличении скорости. Однако влияние низких скоростей (до 1,25 м/с [34], до 2 м/с [3, 26]) несущественно и его можно не учитывать, т. к. при высоких концентрациях и низких скоростях сдвига [35] частицы грунта находятся в тесном контакте, напряжения не зависят от скорости и возникают за счет сухого кулоновского трения. При больших скоростях механизм разрушения грунта будет иным, что требует других методов исследований [36], отличных от методов, изложенных в монографии.

Исходными геометрическими данными, характеризующими нож, будут являться угол резания  $\alpha$ , длина ножа  $l_{BK}$ , ширина ножа  $B$ , угол сдвига  $\psi$  (на данном этапе неизвестный).

Также считаются известными физико-механические свойства грунта: угол внутреннего трения  $\rho$ , угол внешнего трения  $\omega$ , удельное сцепление грунта ненарушенной структуры  $c$ , плотность грунта, перемещаемого по поверхности ножа  $\rho'$ , коэффициент бокового давления  $\xi$ .

В соответствии с расчетной схемой (см. рисунок 2.1) длина  $l_{OB}$  площадки сдвига  $OB$  и толщина  $h'$  перемещаемой по ножу призмы грунта  $OBKD$  определяются следующим образом:

$$l_{OB} = \frac{h}{\sin \psi}; \quad (2.1)$$

$$h' = l_{OB} \sin(\alpha + \psi). \quad (2.2)$$

Тогда площадь  $S_{OBKD}$  боковой поверхности призмы грунта  $OBKD$  и вес этой призмы  $G$  будут найдены по формулам:

$$S_{OBKD} = h'l_{BK}; \quad G = S_{OBKD} B \rho' g, \quad (2.3)$$

где  $B$  – ширина ножа.

В момент сдвига по площадке  $OB$  во второй фазе при «течении» грунта на призму  $OBKD$ , кроме собственного веса  $G$ , действуют со стороны ножа и площадки сдвига следующие силы:  $R^{\max}$  – реакция со



стороны ножа, отклоненная под углом внешнего трения  $\omega$  от нормали к ножу;  $E^{\max}$  – реакция грунта со стороны площадки сдвига, отклоненная под углом внутреннего трения  $\rho$  от нормали к площадке;  $C_{OB}^{\max}$  – сила сцепления грунта по площадке сдвига.

Силу сцепления можно рассчитать как

$$C_{OB}^{\max} = \frac{Bch}{\sin \psi}. \quad (2.4)$$

Из уравнений проекций всех сил, воспринимаемых призмой  $OBKD$ , на оси  $X$  и  $Y$

$$\sum X = R^{\max} \sin(\alpha + \omega) - E^{\max} \sin(\psi + \rho) - C_{OB}^{\max} \cos \psi = 0;$$

$$\sum Y = G - R^{\max} \cos(\alpha + \omega) - E^{\max} \cos(\psi + \rho) + C_{OB}^{\max} \sin \psi = 0$$

можно получить

$$E^{\max} = \frac{1}{\sin(\alpha + \omega + \psi + \rho)} \left[ G \sin(\alpha + \omega) - C_{OB}^{\max} \cos(\alpha + \omega + \psi) \right]; \quad (2.5)$$

$$R^{\max} = \frac{1}{\sin(\alpha + \omega)} \left[ E^{\max} \sin(\psi + \rho) + C_{OB}^{\max} \cos \psi \right]. \quad (2.6)$$

Далее следует найти приведенное давление  $q$ , действующее на формируемую площадку  $OB$  непосредственно в момент сдвига, что необходимо для определения угла сдвига (см. рисунок 2.1, б).

Сила  $Q'$ , действующая на рассматриваемый откос в момент сдвига, является геометрической суммой сил, противоположно направленных силам  $E^{\max}$  и  $C_{OB}^{\max}$  (см. рисунок 2.1, а). Действительное давление  $q'$  будет являться геометрической суммой давлений от сил, противоположно направленных силам  $E^{\max}$  и  $C_{OB}^{\max}$ , т. е.  $\bar{q}' = \bar{e} + \bar{c}$  (см. рисунок 2.1, б).

Приведенное давление  $q$  является геометрической суммой действительного давления  $q'$  и давления связности  $H$ :  $\bar{q} = \bar{q}' + H$ ; его можно также найти следующим образом:

$$q = \frac{E^{\max}}{Bl_{OB}} + H = \frac{E^{\max} \sin \psi}{Bh} + \frac{c}{\sin \rho}. \quad (2.7)$$

При этом угол отклонения этого давления от нормали  $\delta_{\max}$  в момент сдвига будет равен  $\rho$ , т. е.  $\delta_{\max} = \rho$ . Так как приведенное давление зависит от угла сдвига  $\psi$ , т. е. имеет вид  $q = f(\psi)$ , то для определения угла большого сдвига необходимо решить систему уравнений. В эту систему при отсутствии призмы волочения входят уравнения (1.33) и (1.35), имеющие вид  $\psi = f(q)$ , и (2.7), имеющее вид  $q = f(\psi)$ , вместе с дополнительными уравнениями, их обслуживающими. Система уравнений решается итерационными методами.

После определения угла сдвига с помощью (2.5) и (2.6) можно рассчитать значения силовых параметров, характеризующих процесс резания и действующих непосредственно в момент большого сдвига грунта по площадке скольжения  $OB$ .

Силы  $E^{\min}$  и  $R^{\min}$ , действующие после сдвига, находят, как и в предыдущем случае, исходя из проекций на оси  $X$  и  $Y$  сил, воспринимаемых призмой грунта  $OBKD$  после сдвига:

$$E^{\min} = G \frac{\sin(a + \omega)}{\sin(a + \omega + \psi + \rho)}; \quad (2.8)$$

$$R^{\min} = E^{\min} \frac{\sin(\psi + \rho)}{\sin(a + \omega)}. \quad (2.9)$$

Согласно схеме на рисунке 2.1 составляющие сопротивления резанию определяются как

$$P_1 = R \sin(a + \omega); \quad (2.10)$$

$$P_2 = R \cos(a + \omega). \quad (2.11)$$

Для расчета сил  $P_1^{\max}$  и  $P_2^{\max}$ , действующих в момент сдвига, в уравнения (2.10) и (2.11) вместо  $R$  следует подставлять значение силы  $R^{\max}$ , полученное из (2.6), для сил  $P_1^{\min}$  и  $P_2^{\min}$ , действующих после сдвига, – значение силы  $R^{\min}$  из (2.9).

Амплитуда колебаний составляющих сопротивления резанию при достаточно быстро протекающем процессе сдвига грунта:

$$\Delta P_1 = P_1^{\max} - P_1^{\min}; \quad (2.12)$$

$$\Delta P_2 = P_2^{\max} - P_2^{\min}. \quad (2.13)$$

*Учет сопротивлений по боковым граням.* В предыдущих уравнениях взаимодействие ножа с грунтом рассматривалось без учета дополнительных сопротивлений, возникающих по боковым граням ножа. Эти сопротивления незначительны при широких ножах [3, 18], однако их учет необходим, если нож достаточно узок. Экспериментально установлено [2, 3, 16], что отделяемое ножом от грунта тело имеет расширяющуюся кверху форму. Угол наклона боковых граней этого тела будет зависеть прежде всего от давления, действующего на эти боковые грани в момент сдвига, физико-механических свойств грунта и некоторых других параметров, характеризующих условия резания. Как при наличии, так и при отсутствии расширений сопротивления, возникающие по боковым граням, можно оценить, не учитывая некоторые физические процессы вследствие их сложности и относительной незначительности. Аналогичный подход используется и в [3, 18].

Рассмотрев рисунок 2.2, можно оценить силы, возникающие на боковых поверхностях *ОВМ*. Сопротивление сдвигу по этим торцам зависит как от сил трения, так и от сцепления грунта по этим поверхностям.

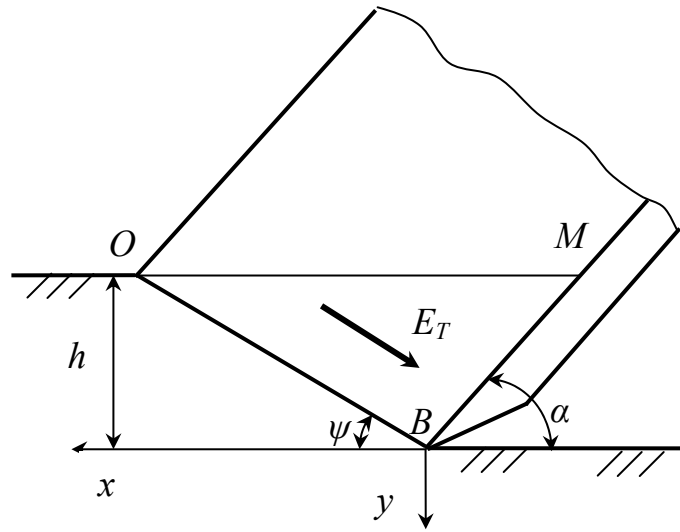
Применительно к рассматриваемому случаю нормальные напряжения, действующие на боковую поверхность *ОМВ*, можно найти следующим образом:

$$\sigma = \xi \sigma_1, \quad (2.14)$$

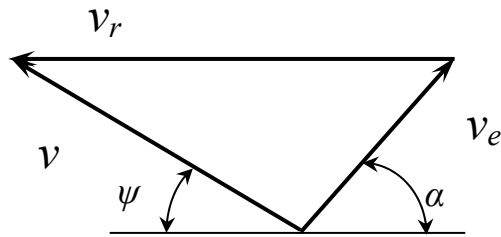
где  $\xi$  – коэффициент бокового давления;

$\sigma_1$  – наибольшее главное напряжение, за которое принимается действительное нормальное давление от силы  $E^{\max}$ , направленное со стороны формируемой площадки сдвига.

а)



б)



а – расчетная схема; б – план скоростей

Рисунок 2.2 – Сдвиг грунта по боковой грани

Действительное давление на площадку сдвига

$$q_E^{\max} = \frac{E^{\max}}{l_{OB} B}. \quad (2.15)$$

Его нормальная величина определится следующим образом:

$$\sigma_1 = q_E^{\max} \cos \omega. \quad (2.16)$$

Значение коэффициента бокового давления принимается по результатам измерения физико-механических свойств грунта или рассчитывается по формуле Г. И. Покровского [37]

$$\xi = 1 - 0,74 \operatorname{tg} \rho - \frac{0,52c}{\sigma_1}.$$

Предельные касательные напряжения, действующие на боковой грани  $OMB$  в момент сдвига, определяются с учетом (2.14)–(2.16) по формуле Кулона (1.4)

$$\tau = c + \xi q_E^{\max} \cos \omega \operatorname{tg} \rho. \quad (2.17)$$

Сдвигу грунта по боковой грани  $OMB$  препятствует сила

$$E_T^{\max} = S_{OMB} \cdot \tau, \quad (2.18)$$

где  $S_{OMB}$  – площадь боковой грани  $OMB$ , взаимодействующая с грунтом ненарушенной структуры,

$$S_{OMB} = \frac{h^2}{2} \left( \frac{1}{\operatorname{tg} \alpha} + \frac{1}{\operatorname{tg} \psi} \right).$$

После сдвига величина силы  $E_T^{\max}$  уменьшится вследствие разрушения сцепления по боковой грани до значения  $E_T^{\min}$ . В этом случае на площадку сдвига будет действовать давление

$$q_E^{\min} = \frac{E_T^{\min}}{l_{OB} B}.$$

Это значение подставляется в (2.17) при  $c = 0$ . С помощью (2.18) определяется величина силы  $E_T^{\min}$ , действующей непосредственно после сдвига:

$$E_T^{\min} = S_{OMB} \xi q_E^{\min} \cos \omega \operatorname{tg} \rho. \quad (2.19)$$

Таким образом, по торцам сдвигаемой призмы грунта действует дополнительное сопротивление  $E_T$ , которое следует учесть.

Рассматривается многоугольник сил, действующих на перемещаемую по ножу призму грунта  $OBKD$ , с учетом определенной выше силы  $E_T$  (рисунок 2.3).

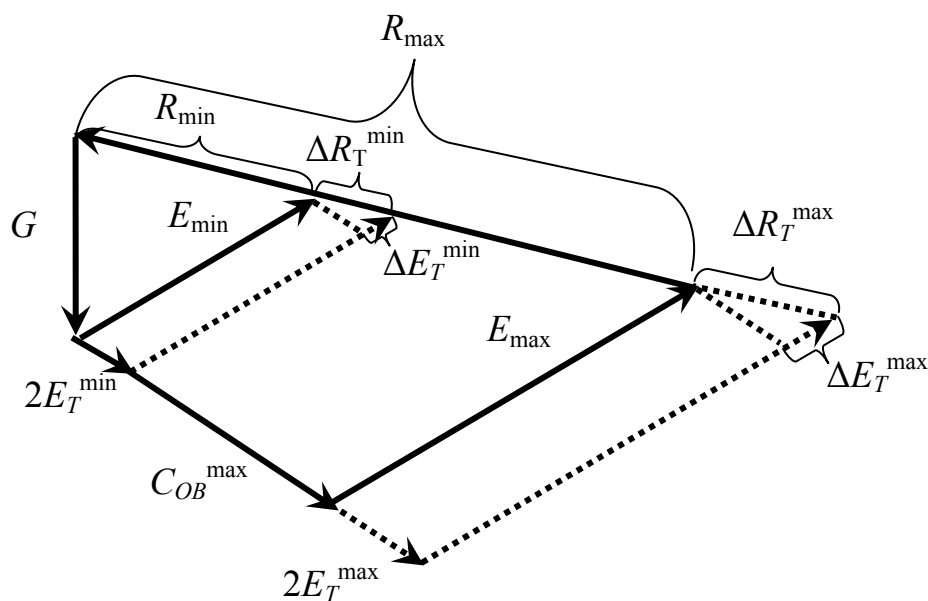


Рисунок 2.3 – Многоугольник сил, действующих на призму  $MCB_1$

В момент сдвига на эту призму действуют ее вес  $G$ , сила сцепления  $C_{OB}^{max}$ , действующая по площадке сдвига  $OB$ , сила  $R^{max}$ , действующая со стороны ножа, сила  $E^{max}$ , действующая со стороны площадки сдвига  $OB$ , две силы  $E_T^{max}$ , препятствующие сдвигу по обоим боковым граням  $OMB$ .

Из рисунка видно, что дополнительные сопротивления  $2E_T^{max}$  приводят к увеличению силы  $E^{max}$  и силы  $R^{max}$  соответственно на  $\Delta E_T^{max}$  и  $\Delta R_T^{max}$ . Но такое увеличение  $E^{max}$  и  $R^{max}$  является локальным, действующим на площадку  $OB$  и нож в непосредственной близости от боковых граней  $OMB$  перемещаемой призмы  $OBKD$  и не изменяющим давления по длине ножа и площадке сдвига  $OB$ .

Поэтому при определении сопротивления грунта резанию как непосредственно в момент сдвига, так и сразу после него достаточно учесть приращение  $\Delta R_T^{max}$  силы  $R^{max}$ , действующей в момент сдвига, и приращение  $\Delta R_T^{min}$  силы  $R^{min}$ , действующей после сдвига.

Многоугольник сил, действующих на сдвигаемую призму после сдвига, также изображен на рисунке 2.3. Силы, изменяющиеся в момент сдвига и действующие сразу после него, обозначены индексом «min».

Выделяется треугольник, составленный силами  $2E_T^{\max}$ ,  $\Delta E_T^{\max}$ ,  $\Delta R_T^{\max}$ , определяется приращение  $\Delta R_T^{\max}$  силы  $R^{\max}$  в момент сдвига:

$$\Delta R_T^{\max} = 2E_T^{\max} \frac{\cos \omega}{\sin(\alpha + \omega + \rho + \varphi)}. \quad (2.20)$$

Аналогично рассчитывается приращение  $\Delta R_T^{\min}$  силы  $R^{\min}$ :

$$\Delta R_T^{\min} = 2E_T^{\min} \frac{\cos \omega}{\sin(\alpha + \omega + \rho + \varphi)}. \quad (2.21)$$

Из рисунка 2.3 видно, что увеличение касательной и нормальной составляющих сопротивления резанию в момент сдвига определяется как

$$\Delta P_{1T}^{\max} = \Delta R_T^{\max} \sin(\alpha + \omega); \quad \Delta P_{2T}^{\max} = \Delta R_T^{\max} \cos(\alpha + \omega) \quad (2.22)$$

и сразу после сдвига –

$$\Delta P_{1T}^{\min} = \Delta R_T^{\min} \sin(\alpha + \omega); \quad \Delta P_{2T}^{\min} = \Delta R_T^{\min} \cos(\alpha + \omega). \quad (2.23)$$

Таким образом, в (2.10) и (2.11) для учета дополнительного сопротивления по боковым граням следует подставлять соответствующие значения  $\Delta P_{1T}^{\max}$ ,  $\Delta P_{2T}^{\max}$  или  $\Delta P_{1T}^{\min}$ ,  $\Delta P_{2T}^{\min}$  из (2.22) и (2.23).

При свободном резании дополнительные сопротивления отсутствуют, а при полусвободном уравнения (2.20) и (2.21) должны использоваться без коэффициента 2.

Изложенный метод расчета обеспечивает вычисление параметров, характеризующих процесс резания грунта плоским рабочим органом, учитывает положение площадки сдвига и позволяет получить экстремальные значения составляющих сопротивления резанию, действующие на нож как непосредственно в момент большого сдвига грунта, так и сразу после него.

## 2.2 Сопротивление грунта резанию при наличии призмы волочения

Расчет и исследование резания грунта плоским рабочим органом при наличии призмы волочения, которое можно считать копанием грунта, позволяют на примере простейшего рабочего органа, когда не мешают другие конструктивные особенности, выявить особенности влияния призмы волочения на физические процессы при копании и оценить их количественно.

Призма волочения увеличивает сопротивление движению срезанного грунта по поверхности ножа. При этом давление на площадку сдвига, с одной стороны, увеличивается, а с другой – оказывает дополнительное воздействие на разрабатываемую поверхность грунта, что также изменяет характер стружкообразования, поскольку повышается устойчивость грунта.

*Расчет сил, действующих на призму волочения.* Определяется вес призмы волочения  $MOD$ , для чего рассчитывается площадь одноименного треугольника (рисунок 2.4):

$$S_{MOD} = \frac{l^2 \sin^2 \alpha}{2} \left( \frac{1}{\operatorname{tg} \gamma} - \frac{1}{\operatorname{tg} \alpha} \right), \quad (2.24)$$

где  $\gamma$  – угол наклона призмы волочения;

$l$  – длина площадки  $OD$ , принятая равной длине рабочего органа.

Тогда

$$G_{MOD} = BS_{MOD} \rho^r g, \quad (2.25)$$

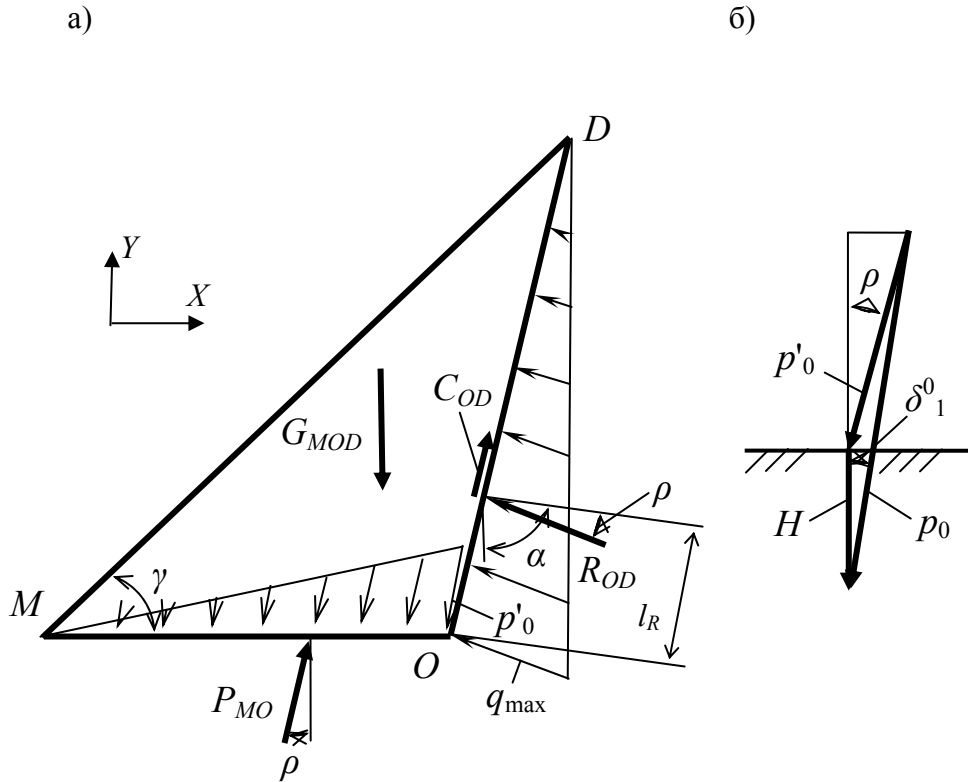
где  $\rho^r$  – плотность грунта в призме волочения, которую можно считать равной плотности грунта, перемещаемого по ножу.

На призму волочения, кроме веса, действуют следующие силы:  $P_{MO}$  – сила со стороны поверхности разрабатываемого грунта;  $R_{OD}$  – сила со стороны потока грунта  $OBKD$ , перемещаемого по ножу;  $C_{OD}$  – сила от частично восстановившегося сцепления на площадке скольжения  $OD$ ,

$$C_{OD} = c_p l B, \quad (2.26)$$

где  $c_p$  – удельное сцепление грунта в призме волочения.





а – расчетная схема; б – схема для определения приведенных давлений на поверхности грунта

Рисунок 2.4 – Перемещение призмы волочения

Уравнения равновесия призмы волочения:

$$\sum X = P_{MO} \sin \rho - R_{OD} \sin(\alpha - \rho) + C_{OD} \cos \alpha = 0;$$

$$\sum Y = P_{MO} \cos \rho - G_{MOD} + R_{OD} \cos(\alpha - \rho) + C_{OD} \sin \alpha = 0.$$

Из этих уравнений

$$R_{OD} = G_{MOD} \frac{\sin \rho}{\sin \alpha} + C_{OD} \frac{\cos(\alpha + \rho)}{\sin \alpha}; \quad (2.27)$$

$$P_{MO} = \frac{1}{\sin \rho} [R_{OD} \sin(\alpha - \rho) - C_{OD} \cos \alpha]. \quad (2.28)$$

Призма волочения изменяет граничные условия на площадке  $MO$ . Их можно найти, рассмотрев схему на рисунке 2.4, б. При этом нужно отметить, что за действительное давление  $p'$  необходимо принимать давление в точке  $O$ . Это следует из того, что при выходе площадки скольжения на дневную поверхность происходит большой сдвиг, сопровождающийся «течением» грунта, при котором площадки скольжения образуют узкую зону, примыкающую к откосу  $OB$ . Эта зона выходит на дневную поверхность вблизи точки  $O$ , что и оправдывает принятое решение.

Таким образом, если принять эпюру распределения давлений по подошве  $MO$  призмы волочения треугольной, то для точки  $O$

$$p'_o = \frac{2P_{MO}}{Bl_{MO}}, \quad (2.29)$$

где  $l_{MO}$  – длина площадки  $MO$ ,  $l_{MO} = l \sin \alpha \left( \frac{1}{\operatorname{tg} \gamma} - \frac{1}{\operatorname{tg} \alpha} \right)$ .

Согласно рисунку 2.4, б, для точки  $O$

$$\delta_1^0 = \operatorname{arctg} \frac{p'_0 \sin \rho}{p'_0 \cos \rho + H}, \quad p^o = \sqrt{(p'_0 \sin \rho)^2 + (p'_0 \cos \rho + H)^2}. \quad (2.30)$$

Приведенное давление, действующее со стороны призмы волочения на грунт в месте выхода площадки большого сдвига, и угол его отклонения являются теми граничными условиями на поверхности разрабатываемого грунта, которые следует использовать при определении угла большого сдвига.

*Расчет угла сдвига.* Рассматривается вторая фаза разрушения грунта (рисунок 2.5) при его «течении», в момент когда формируется площадка сдвига  $OB$ . В этом случае на поток грунта  $OBKD$  по сравнению с резанием без призмы волочения дополнительно действуют указанные выше силы  $R_{OD}$  и  $C_{OD}$ .

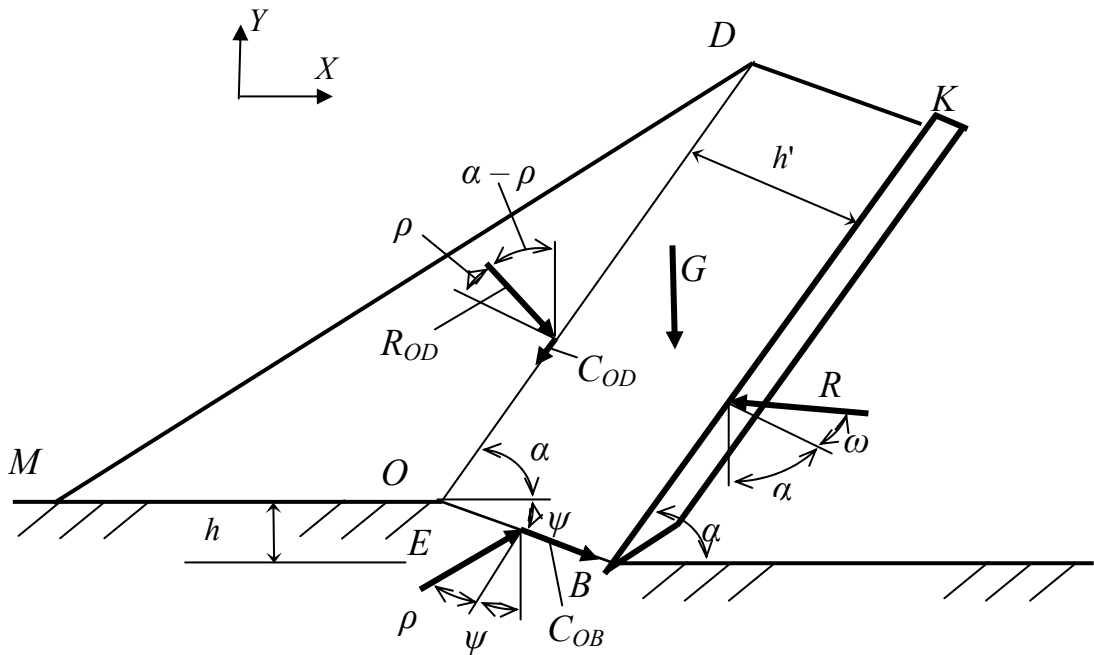


Рисунок 2.5 – Схема расчета сил сопротивления копанию

Соответственно, изменятся и уравнения проекций всех сил, воспринимаемых призмой  $OBKD$ , на оси  $X$  и  $Y$ :

$$\begin{aligned} \sum X = R_{OD} \sin(\alpha - \rho) - C_{OD} \cos \alpha - R^{\max} \sin(\alpha + \omega) + \\ + C_{OB}^{\max} \cos \psi + E^{\max} \sin(\psi + \rho) = 0; \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \sum Y = -G - R_{OD} \cos(\alpha - \rho) - C_{OD} \sin \alpha + R^{\max} \cos(\alpha + \omega) - \\ - C_{OB}^{\max} \sin \psi + E^{\max} \cos(\psi + \rho) = 0. \end{aligned}$$

Из полученной системы уравнений

$$E^{\max} = \frac{G \sin(\alpha + \omega) - C_{OB}^{\max} \cos(\alpha + \omega + \psi) + C_{OD} \cos \omega + R_{OD} \sin(\omega + \rho)}{\sin(\alpha + \omega + \psi + \rho)}; \quad (2.31)$$

$$R^{\max} = \frac{E^{\max} \sin(\psi + \rho) + C_{OB}^{\max} \cos \psi - C_{OD} \cos \alpha + R_{OD} \sin(\alpha - \rho)}{\sin(\alpha + \omega)}. \quad (2.32)$$

Приведенное давление, действующее на площадку  $OB$  в момент сдвига, рассчитывается по (2.7), в которое следует подставлять значение силы  $E^{\max}$ , полученное по (2.31).

Для определения угла большого сдвига необходимо решать итерационными методами систему уравнений, в которую входят уравнения (1.23) и (1.27) типа  $\psi = f(q)$  с учетом уточненных граничных условий по (2.30) и (2.7) типа  $q = f(\psi)$ , полученное с учетом значения силы  $E^{\max}$  по (2.31).

Система уравнений решается по следующему алгоритму:

- выбирается начальное значение угла сдвига  $\psi$  (удобно выбирать значение около  $30^\circ$ ) и вычисляются размеры перемещаемого потока грунта;

- вычисляются размеры призмы волочения и определяются силы, действующие с ее стороны на поверхность разрабатываемого грунта и перемещаемый по рабочему органу поток грунта;

- вычисляются граничные условия на поверхности грунта в точке  $O$ ;

- определяются силы, действующие на площадку сдвига;

- определяется приведенное давление на эту площадку;

- определяется угол сдвига, выдерживающий это давление;

- сравнивается полученное значение угла сдвига с начальным, если они не совпадают, меняется соответствующим образом начальное значение угла сдвига и повторяются вычисления до получения результата с требуемой точностью.

*Расчет сил сопротивления резанию.* После определения угла сдвига по уравнениям (2.3), (2.4), (2.25), (2.27), (2.28), (2.31), (2.32) можно рассчитать значения силовых параметров, характеризующих процесс резания плоским рабочим органом при наличии призмы волочения, действующих непосредственно в момент большого сдвига грунта по площадке сдвига  $OB$ .

После сдвига сила  $C_{OB}^{\min}$  станет равной нулю. Силы  $E^{\min}$  и  $R^{\min}$ , действующие после сдвига, определяются, как и ранее, исходя из проекций на оси  $X$  и  $Y$  сил, воспринимаемых призмой грунта  $OBKD$  после сдвига:

$$\sum X = R_{OD} \sin(\alpha - \rho) - C_{OD} \cos \alpha - R^{\min} \sin(\alpha + \omega) + E^{\min} \sin(\psi + \rho) = 0;$$

$$\sum Y = -G - R_{OD} \cos(\alpha - \rho) - C_{OD} \sin \alpha + R^{\min} \cos(\alpha + \omega) + E^{\min} \cos(\psi + \rho) = 0.$$

Отсюда

$$E_{\min} = \frac{G \sin(\alpha + \omega) + C_{OD} \cos \omega + R_{OD} \sin(\omega + \rho)}{\sin(\alpha + \omega + \psi + \rho)}; \quad (2.33)$$

$$R_{\min} = \frac{E_{\min} \sin(\psi + \rho) - C_{OD} \cos \alpha + R_{OD} \sin(\alpha - \rho)}{\sin(\alpha + \omega)}. \quad (2.34)$$

С помощью (2.10) и (2.11), (2.32) и (2.34) можно получить экстремальные значения составляющих сопротивления копанию. Амплитуда колебаний, составляющих сопротивления резанию, определяется по (2.12) и (2.13).

Метод расчета сопротивлений по боковым граням ножа не изменится.

Таким образом, изложенные теоретические основы позволяют исследовать и оценить влияние конструктивных параметров рабочего органа, физико-механических свойств грунта, режима работы, а также призмы волочения на копание грунта простейшим плоским рабочим органом.

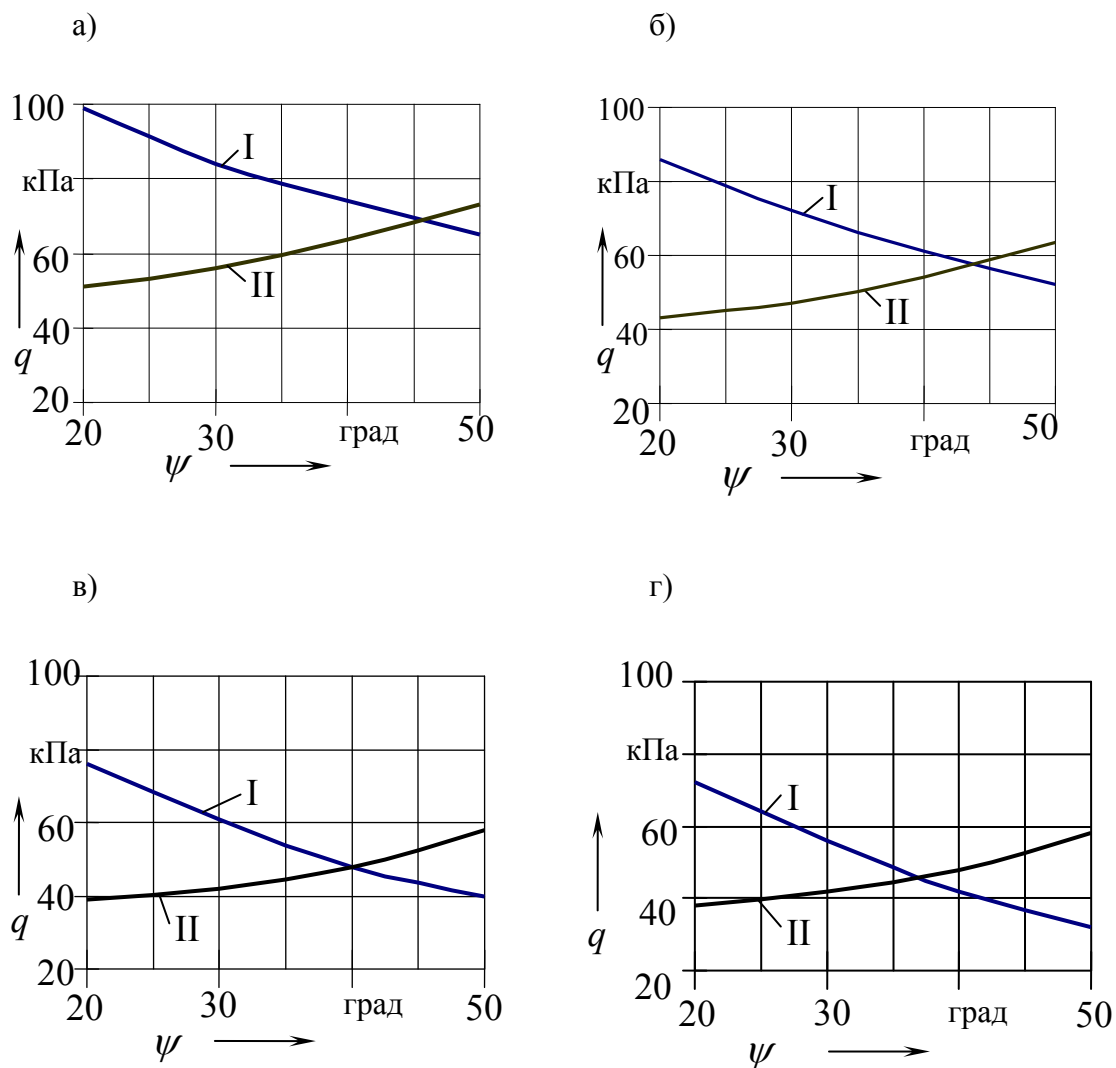
### ***2.3 Исследование взаимодействия плоского рабочего органа с грунтом***

Представленные далее материалы наглядно показывают возможности разработанных методов расчета для проведения оптимизации рабочих органов землеройных машин.

*Исследование угла сдвига.* Для выяснения физической сути разрушения грунта при резании рассматривается графическое решение системы уравнений для определения угла сдвига, состоящей из (1.33), (1.35) и (2.7). Численные решения найдены при высоте ножа  $h_1 = l_{BK} \sin \alpha = 0,2$  м, толщине стружки  $h = 0,2$  м, плотности грунта на ноже  $\rho^r = 1,8$  т/м<sup>3</sup>, угле резания  $\alpha = 30^\circ$  и единичной ширине ножа, т. е. при  $B = 1$ .

Основными расчетными физико-механическими свойствами грунта, от которых зависит сопротивление сдвигу, являются внутреннее трение и сцепление. Влияние угла внутреннего трения рассматривается при удельном сцеплении грунта  $c = 20$  кПа.

Результаты вычислений представлены на рисунке 2.6. Из рисунка видно, что с увеличением угла внутреннего трения устойчивость откоса при одной и той же величине давления, действующего на него, снижается (кривые I).



а – при  $\rho = 20^\circ$ ; б – при  $\rho = 25^\circ$ ; в – при  $\rho = 30^\circ$ ; г – при  $\rho = 35^\circ$ ; I – кривая предельного давления  $\psi = f(q)$ ; II – кривая зависимости  $q = f(\psi)$

Рисунок 2.6 – Графическое определение угла сдвига при разных значениях угла внутреннего трения

Условно задаются определенным постоянным значением давления  $q_E^{\max}$  от силы  $E^{\max}$ , действующей на площадку сдвига, оценивается влияние угла внутреннего трения  $\rho$  на угол большого сдвига  $\psi$ . Приведенное

давление  $q$  в соответствии с (2.7)

$$q = q_E^{\max} + \frac{c}{\sin \rho}. \quad (2.35)$$

Если численное значение  $q_E^{\max}$  принять равным удельному сцеплению грунта  $c$ , то приведенное давление  $q$  будет иметь вид:

$$q = c + \frac{c}{\sin \rho} = c \frac{1 + \sin \rho}{\sin \rho}.$$

При отсутствии призмы волочения давление  $p$  на поверхности горизонтальной засыпки будет равно давлению связности  $H = c \cdot \operatorname{ctg} \rho$ , при этом углы  $\delta_1$  и  $\Delta_1$  будут равны нулю. Тогда из неравенства (1.32) определяется граничное значение приведенного давления  $q$ , разделяющего решения с сингулярной точкой от разрывных решений:

$$q \geq H \frac{\cos \rho}{1 - \sin \rho} = c \frac{\cos^2 \rho}{\sin \rho (1 - \sin \rho)} = c \frac{1 + \sin \rho}{\sin \rho}.$$

Поскольку соблюдается равенство, то для рассматриваемого граничного случая справедливы как уравнение (1.33), при котором существуют решения с сингулярной точкой, так и (1.35), пригодное для решений с линией разрыва.

Действительно, из (1.34) возможно получить для рассматриваемых условий

$$A = \frac{q}{H} \frac{1 - \sin \rho}{\cos \rho} = \frac{c(1 + \sin \rho)(1 - \sin \rho)}{c \sin \rho \operatorname{ctg} \rho \cos \rho} = 1.$$

Из (1.33)

$$\psi = \frac{\pi}{4} - \frac{\rho}{2}.$$

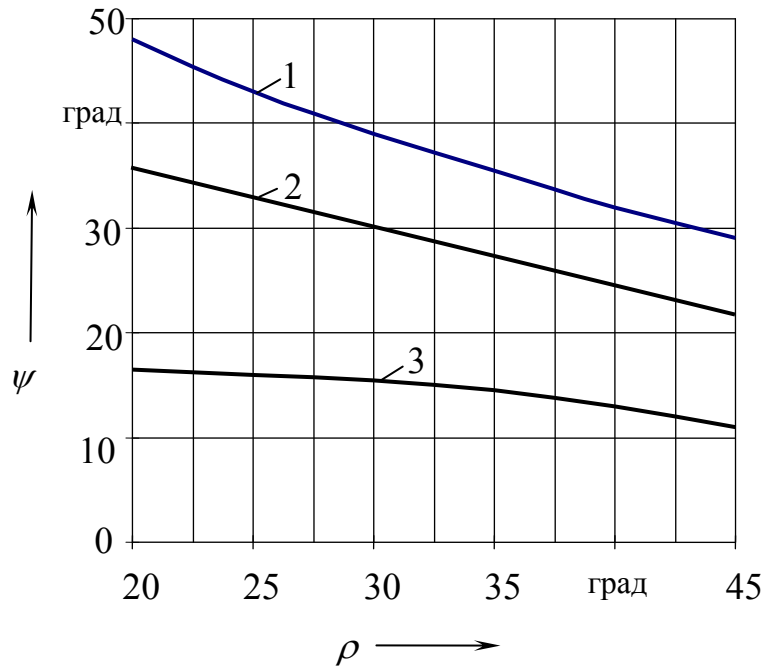
Такое же значение  $\psi$  получается и из (1.35), т. к. из (1.30) и (1.24) при  $A = 1$

$$\delta_p = -\rho; \quad \Delta_p = -\frac{\pi}{2}.$$

Следовательно,

$$\psi = \frac{\pi}{4} - \frac{\rho}{2}.$$

Таким образом, при  $q_E^{\max} = c$  функция  $\psi = f(\rho)$  зависит только от угла внутреннего трения (рисунок 2.7, кривая 2) и является прямолинейной, убывающей с увеличением угла внутреннего трения  $\rho$ . Для наглядности на рисунке 2.7 приведены зависимости  $\psi = f(\rho)$  при  $q_E^{\max} < c$  (кривая 1) и  $q_E^{\max} > c$  (кривая 3). Результаты получены при  $\rho = 30^\circ$ ,  $c = 30$  кПа для значений  $q_E^{\max}$  равных 15, 30 и 60 кПа.



1 – при  $e_{\max} < c$ ; 2 – при  $e_{\max} = c$ ; 3 – при  $e_{\max} > c$

Рисунок 2.7 – Зависимость угла сдвига от угла внутреннего трения грунта

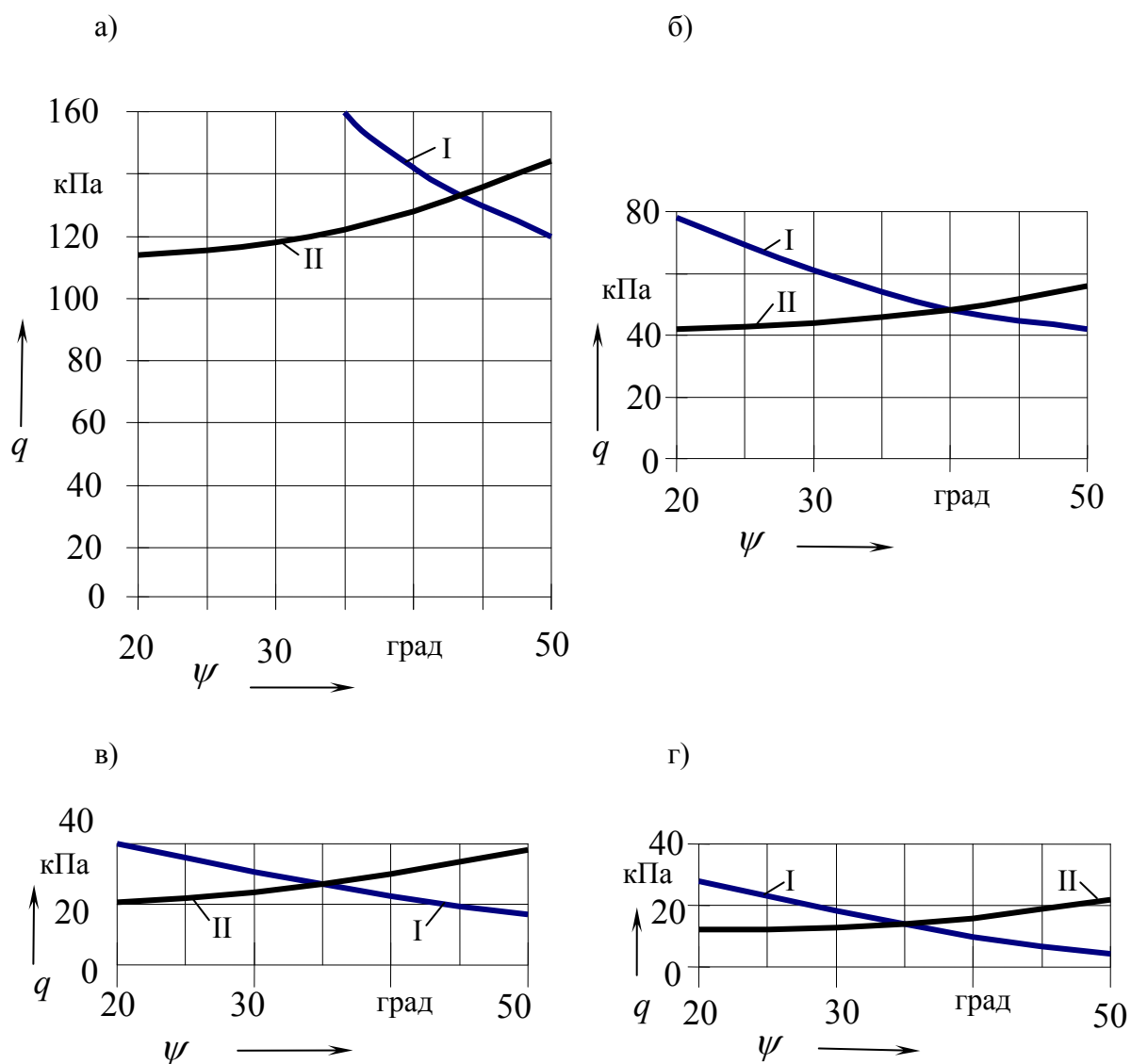
Однако в общем случае зависимость угла сдвига от параметров грунта не является такой однозначной, как это получено при постоянной величине давления  $q_E^{\max}$ .

Так, увеличение угла внутреннего трения приводит к увеличению сил трения, а следовательно, действительного давления  $q_E^{\max}$ . Приведенное



давление  $q$  при этом уменьшается за счет изменения давления связности  $H = c \cdot \text{ctg} \rho$ . Однако уменьшение давления связности, в свою очередь, ухудшает устойчивость откоса грунта, что и приводит к уменьшению угла сдвига.

Графическое решение системы уравнений для определения угла сдвига для разных значений удельного сцепления грунта приведено на рисунке 2.8.



а – при  $c = 80$  кПа; б – при  $c = 40$  кПа; в – при  $c = 10$  кПа; г – при  $c = 5$  кПа: I – кривая предельного давления; II – кривая зависимости  $q = f(\psi)$

Рисунок 2.8 – Графическое определение угла сдвига при разных значениях удельного сцепления грунта

Из рисунка видно, что с уменьшением сцепления приведенное давление  $q$ , действующее на площадку сдвига, уменьшается (кривые II). Однако при этом одновременно уменьшается давление связности, а следовательно, и устойчивость откоса против сдвига (кривые I). В конечном счете величина угла сдвига будет определяться суммарным характером изменения этих кривых.

Далее рассматривается рисунок 2.9. Численные значения получены по (2.35) при  $\rho = 30^\circ$  и постоянном значении  $q_E^{\max} = 30$  кПа.

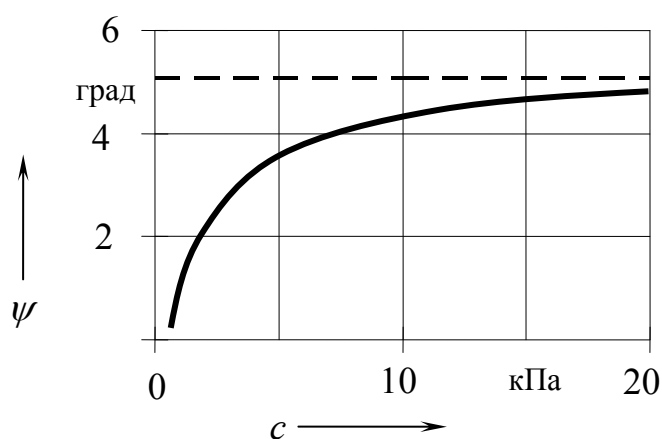


Рисунок 2.9 – Зависимость угла сдвига от сцепления грунта

Интенсивность уменьшения угла сдвига при уменьшении сцепления грунта (см. рисунок 2.9) зависит и от численного значения удельного сцепления. Например, при уменьшении сцепления со 100 до 80 кПа (на 20 кПа) угол сдвига уменьшается только на  $1,7^\circ$  (с  $43,4$  до  $41,7^\circ$ ). При изменении же сцепления на те же 20 кПа, но при малых его значениях например, с 40 до 20 кПа, угол сдвига уменьшается уже на  $12^\circ$  (с  $34$  до  $22^\circ$ ).

Следует также отметить, что при значительном увеличении сцепления грунта угол сдвига асимптотически приближается к некоторому постоянному значению. Это происходит вследствие того, что величина  $q_E^{\max}$  при бесконечном увеличении сцепления является бесконечно малой по сравнению со вторым членом уравнения (2.35) и ей можно пренебречь.

Тогда

$$q_{\max} = \frac{c}{\sin \rho},$$

а величина  $A$  (см. уравнение (1.34)) определится как

$$A = \frac{q}{H} \cdot \frac{1 - \sin \rho}{\cos \rho} = \frac{\frac{c}{\sin \rho} (1 - \sin \rho)}{c \operatorname{ctg} \rho \cos \rho} = \frac{1 - \sin \rho}{\cos^2 \rho}.$$

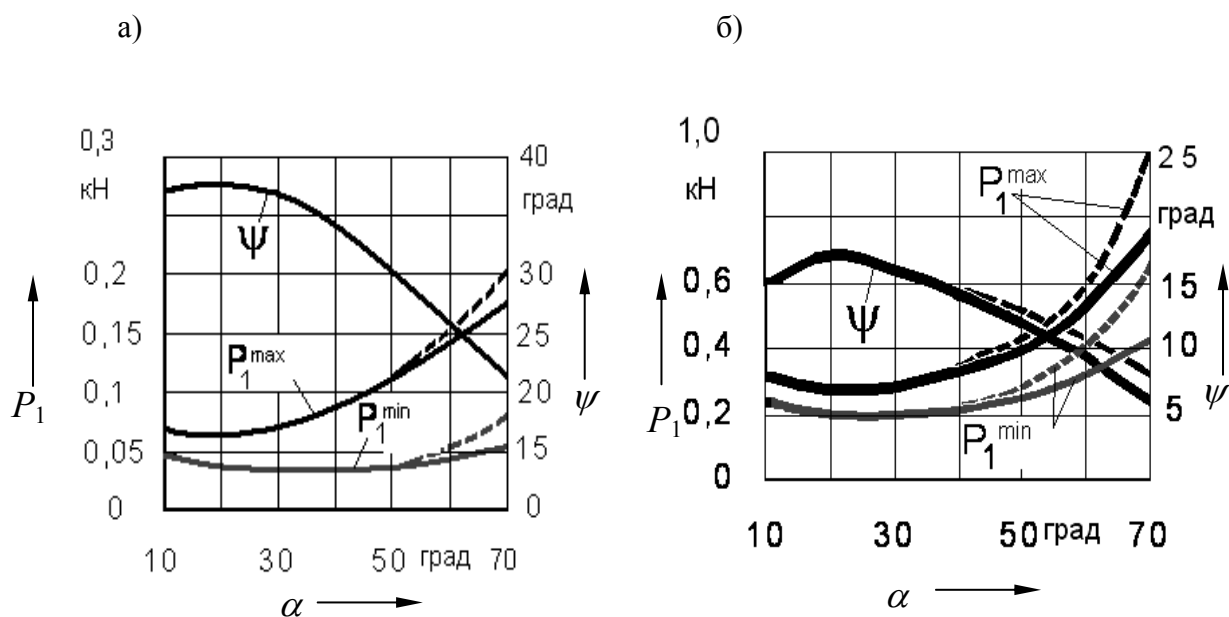
Таким образом, в рассматриваемом случае численное значение  $A$  не зависит от сцепления грунта. Этому значению соответствует угол сдвига  $\psi = 50,7^\circ$ , через который на рисунке 2.9 проведена горизонтальная прямая, являющаяся асимптотой функции  $\psi = f(c)$ . При других исходных данных численные значения будут иными.

Рост сцепления приводит к увеличению как действительного, так и приведенного давления, действующего на площадку сдвига. Однако, несмотря на увеличение давления, угол сдвига увеличивается вследствие значительного повышения устойчивости откоса. В свою очередь, величина угла сдвига также обуславливает значения приведенного и действительного давлений из-за непосредственного изменения длины площадки сдвига и изменения угла при вершине клина, образованного поверхностью ножа и площадкой сдвига, по которым и происходит вытеснение срезанного грунта.

*Исследование резания грунта плоским рабочим органом.* Численные решения получены при значениях параметров грунта ( $\rho_z = 1,6 \text{ т/м}^3$ ;  $\rho = 28^\circ$ ;  $\omega = 25^\circ$ ;  $c = 4 \text{ кПа}$ ), соответствующих параметрам грунта лабораторной установки, где проводились экспериментальные исследования. Расчеты выполнялись для плоского рабочего органа при ширине резания  $B = 0,4 \text{ м}$ , толщине срезаемой стружки  $h = 0,02 \text{ м}$  для двух значений его высоты  $h_1 = 0,1 \text{ м}$  и  $0,5 \text{ м}$ . Высота ножа, связанная с длиной ножа  $l$  зависимостью  $h = l \sin \alpha$ , принята за основной параметр плоского рабочего органа с целью обеспечения одинаковой высоты подъема грунта при разных углах резания.

*Влияние угла резания.* На рисунке 2.10 сплошными линиями изображены результаты расчетов, полученные при отсутствии призмы

волочения. Влияние призмы волочения показано штриховыми линиями для тех углов резания, при которых призма волочения образуется.



а – при  $h_1 = 0,1$  м; б – при  $h_1 = 0,5$  м

Рисунок 2.10 – Влияние угла резания и призмы волочения на угол сдвига  $\psi$  и касательную силу  $P_1$

При относительно невысоком ноже ( $h_1 = 0,1$  м) призма волочения почти не влияет на угол большого сдвига. При больших углах резания наблюдается некоторое изменение экстремальных значений силы сопротивления резанию. Влияние призмы волочения сказывается в большей степени по мере увеличения угла резания.

При резании ножом с большой высотой ( $h_1 = 0,5$  м) влияние призмы волочения более существенно из-за больших размеров по сравнению с предыдущим случаем. Вследствие этого несколько увеличивается угол сдвига и более интенсивно растут экстремальные значения касательной составляющей сопротивления копанью.

Однако только на основании графиков (см. рисунок 2.10) преждевременно делать однозначный вывод об увеличении призмой волочения устойчивости грунта, а вместе с ним и угла большого сдвига.

Влияние призмы волочения на процесс копания многостороннее. С одной стороны, призма волочения изменяет граничные условия на

поверхности разрабатываемого грунта, действительно повышая устойчивость массива грунта от разрушения за счет увеличения давления на эту поверхность. Но, с другой стороны, увеличивается сопротивление наполнению из-за трения и сил остаточного сцепления, действующих на площадке скольжения между потоком грунта, перемещаемым по поверхности плоского рабочего органа, и призмой волочения, за счет чего повышается давление на площадку сдвига, что, в свою очередь, приводит к уменьшению угла большого сдвига. В зависимости от сочетания отмеченных факторов в каждом конкретном случае может произойти как увеличение, так и уменьшение угла сдвига.

*Влияние длины рабочего органа.* Результаты исследований получены для рабочего органа, установленного под углом резания  $\alpha = 60^\circ$ .

Из рисунка 2.11 видно, что экстремальные значения касательной составляющей силы сопротивления резанию, полученные при какой-то определенной длине ножа, значительно увеличиваются при наличии призмы волочения. При этом с увеличением длины ножа влияние призмы волочения на процесс копания все более заметно.

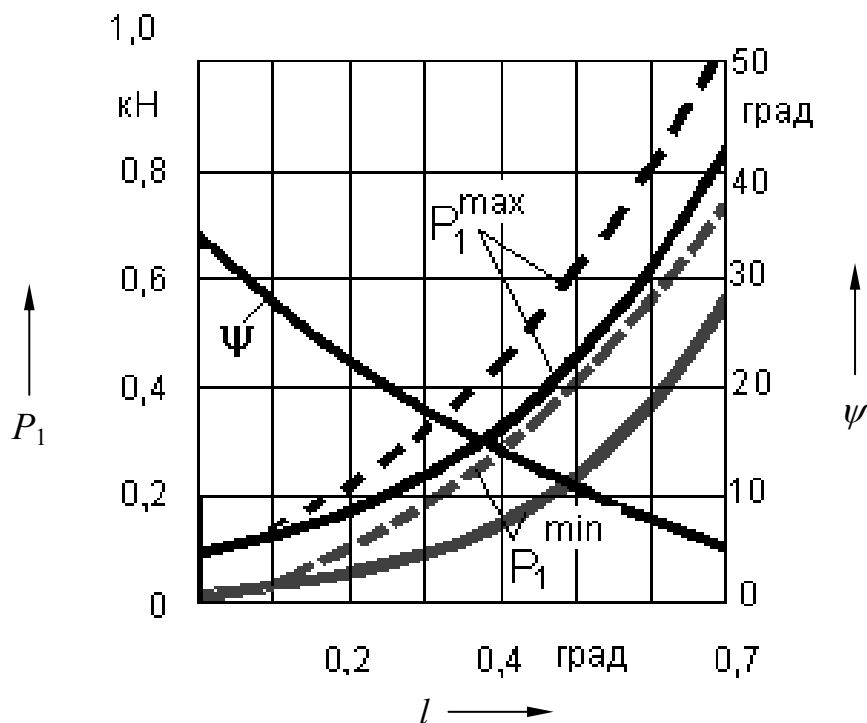


Рисунок 2.11 – Влияние длины рабочего органа и призмы волочения на угол сдвига и касательную силу сопротивления копанию

Также величина угла большого сдвига почти не изменяется призмой волочения по отмеченным выше причинам.

На рисунке 2.12 показано влияние длины ножа на экстремальные значения силы  $P_1$  (сплошная  $P_1^{\max}$  и штриховая  $P_1^{\min}$ ) и на слагаемые, составляющие эти силы. Слагаемые взяты со знаками, с которыми они входят в (2.32) и (2.34), используемые для расчета экстремальных значений силы  $P_1$ . Из рисунка видно, что наибольшее влияние как в момент сдвига ( $E_{\max}$  – сплошная линия), так и после него ( $E_{\min}$  – штриховая линия) оказывает сила  $E$ , действующая со стороны площадки сдвига.

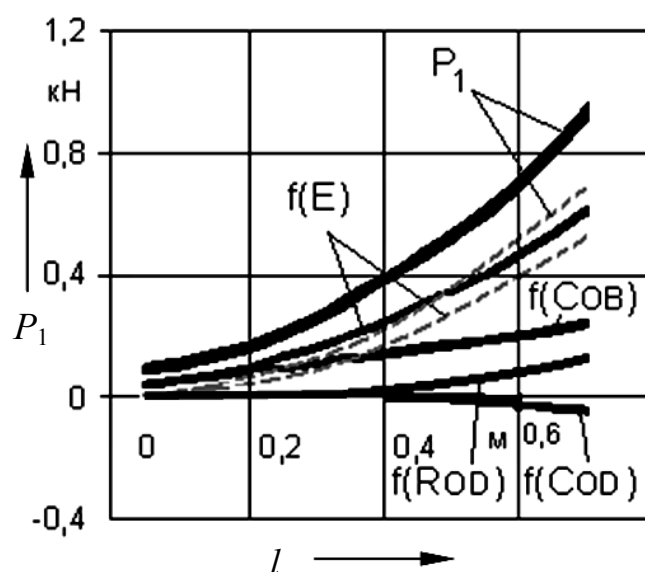


Рисунок 2.12 – Влияние длины ножа на сопротивление копанию и его слагаемые

Второй по величине слагаемой является сила  $C_{ov}^{\max}$ , действующая в момент сдвига.

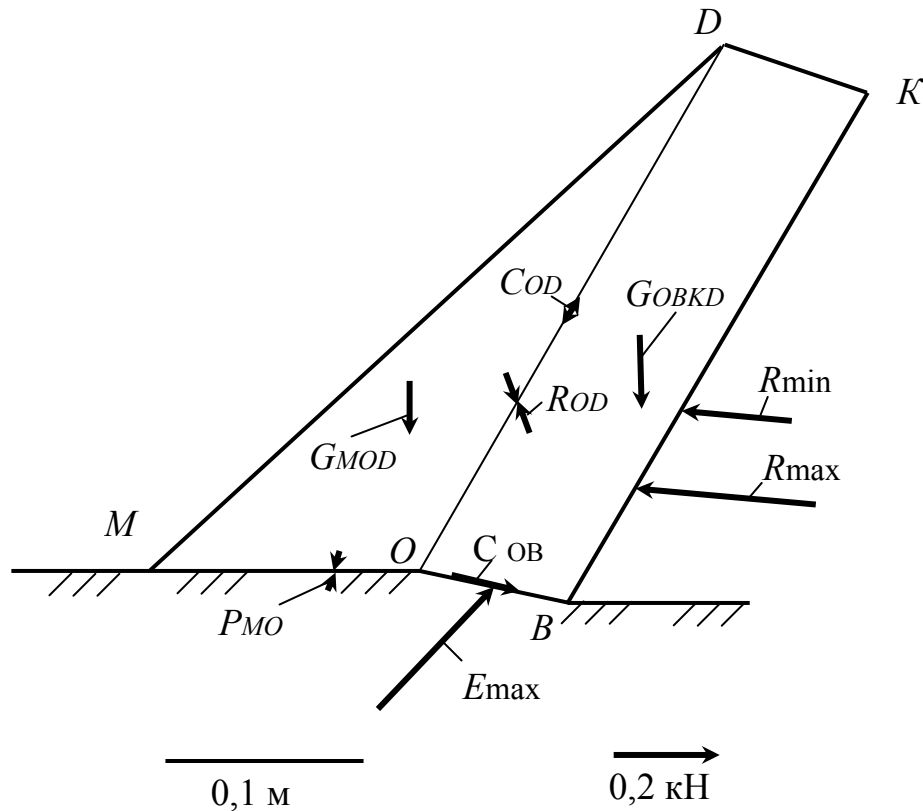
Значения сил  $R_{OD}$  и  $C_{OD}$ , оценивающих влияние призмы волочения, не зависят от большого сдвига. Они являются слагаемыми как силы  $P_1^{\max}$ , так и силы  $P_1^{\min}$ . Следует отметить, что если при длине ножа  $l = 0,3$  м сила  $R_{OD}$  составляет 8,2 % от силы  $P_1^{\max}$  и 13,8 % от силы  $P_1^{\min}$ , то при длине ножа  $l = 0,5$  м – 12,2 и 17,6 % соответственно, а при  $l = 0,7$  м и вовсе 14,1 и 19 %.

Исследования подтверждает сделанный ранее вывод о том, что с увеличением длины ножа влияние призмы волочения на процесс копания плоским рабочим органом все более существенно.

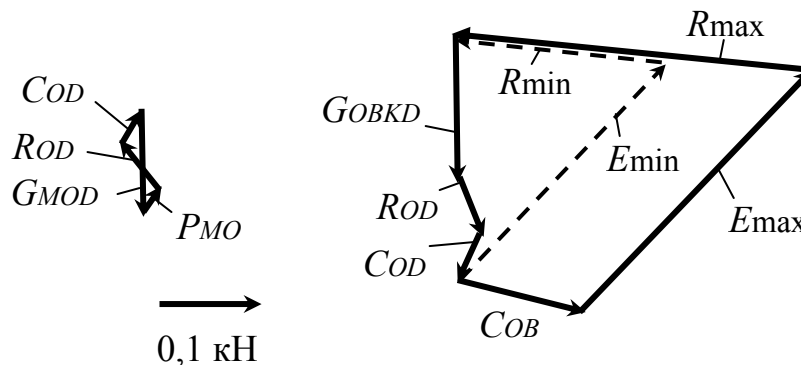
Сила  $C_{OD}$  несколько уменьшает влияние призмы волочения на величину горизонтальной составляющей сопротивления копанию, но нельзя пренебрегать этим влиянием.

На рисунке 2.13 приведена расчетная схема, полученная при длине ножа  $l = 0,3$  м, на которой соблюдены пропорции линейных размеров и векторов сил.

а)



б)



а – масштабная расчетная схема; б – многоугольники сил

Рисунок 2.13 – Копание плоским рабочим органом при  $l_{BK} = 0,3$  м

При этом векторы сил приложены в расчетных точках (расчет обеспечивается программным обеспечением). Характерной особенностью является то, что при большом сдвиге происходит скачкообразное изменение не только силы  $R$ , действующей на нож, но и места ее приложения.

Многоугольники сил, изображенные на рисунке 2.13, б, позволяют оценить взаимодействие силовых параметров при большом сдвиге для данных расчетных условий, а также влияние на них сцепления грунта, разрушаемого при сдвиге в момент отделения стружки.

Изменение абсолютных значений этих сил в зависимости от длины ножа представлено на рисунке 2.14.

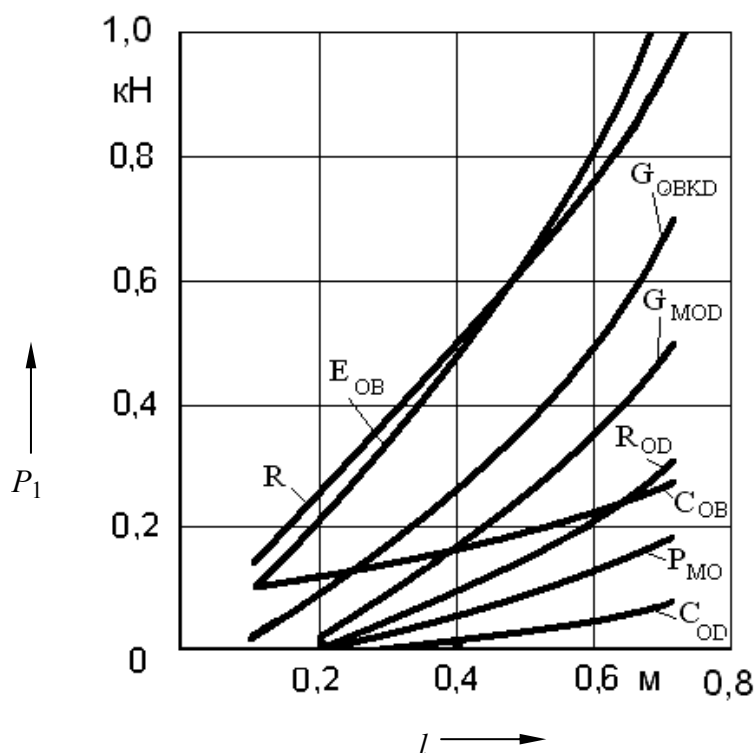


Рисунок 2.14 – Влияние длины ножа на абсолютные значения сил

В рассматриваемых условиях при увеличении длины ножа силы изменяются нелинейно. Во многом это определяется нелинейным характером изменения угла сдвига (см. рисунок 2.11) и таких важных параметров, как вес перемещаемого потока грунта, вес призмы волочения, что видно из соответствующих уравнений и расчетных схем.



*Влияние толщины стружки.* Исследования проводились при угле резания  $\alpha = 60^\circ$  и длине плоского рабочего органа  $l = 0,3$  м.

Наличие призмы волочения изменяет как экстремальные значения составляющих сопротивления копанью, так и угол большого сдвига (рисунок 2.15). Характерной особенностью является изменение прямолинейной зависимости  $\psi = f(h)$  (при отсутствии призмы волочения) на криволинейную (при наличии призмы волочения). Уменьшение угла сдвига при малой толщине стружки ( $h < 0,05$  м при данных условиях) объясняется более интенсивным ростом сопротивления наполнению, а следовательно, и давления на площадку сдвига по сравнению с увеличением давления, действующего на разрабатываемую поверхность грунта со стороны призмы волочения, повышающего устойчивость откоса.

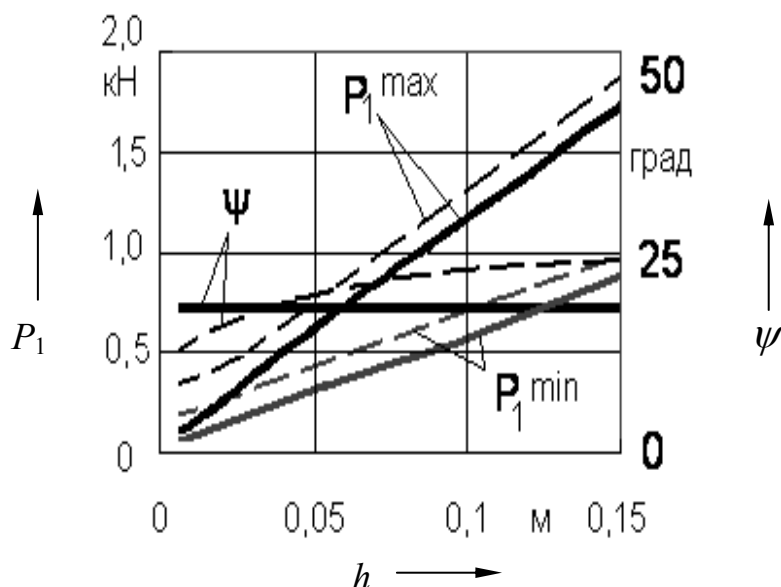


Рисунок 2.15 – Влияние толщины стружки и призмы волочения на угол сдвига и касательную силу сопротивления копанью

В этом случае при относительном уменьшении веса потока грунта  $OBKD$  влияние сил  $R_{OD}$  и  $C_{OD}$  на формирование сопротивления наполнению существенно повышается, что и приводит к полученному результату. И наоборот, при  $h > 0,05$  м влияние сил  $R_{OD}$  и  $C_{OD}$  на сопротивление наполнению будет менее существенным. Устойчивость же откоса при этом несколько повысится из-за более существенной пригрузки призмой волочения поверхности разрабатываемого массива.

Следует отметить, что при малой толщине стружки роль призмы волочения вследствие отмеченных выше причин существенно возрастает. Так, при  $h = 0,05–0,1$  м появление призмы волочения увеличивает значения сил  $P_1^{\max}$  и  $P_1^{\min}$  в среднем на 100–50 %. При  $h = 0,1–0,12$  м такое увеличение сил  $P_1^{\max}$  и  $P_1^{\min}$  составляет только 7–12 %.

*Экспериментальные исследования.* Экспериментальные исследования проводились на специальном стенде в грунтовом канале (рисунок 2.16) лаборатории кафедры СДПТМиО Белорусско-Российского университета [38] с целью получения численных значений геометрических и силовых параметров, характеризующих процесс резания, для сопоставления их с результатами теоретических расчетов, а также с целью выявления особенностей взаимодействия ножа с грунтом при резании.

Развитие теории моделирования [39, 40] позволяет акцентировать внимание на лабораторных исследованиях не только ввиду их меньшей трудоемкости и стоимости, но и вследствие почти неограниченной возможности повторения эксперимента в одних и тех же условиях.

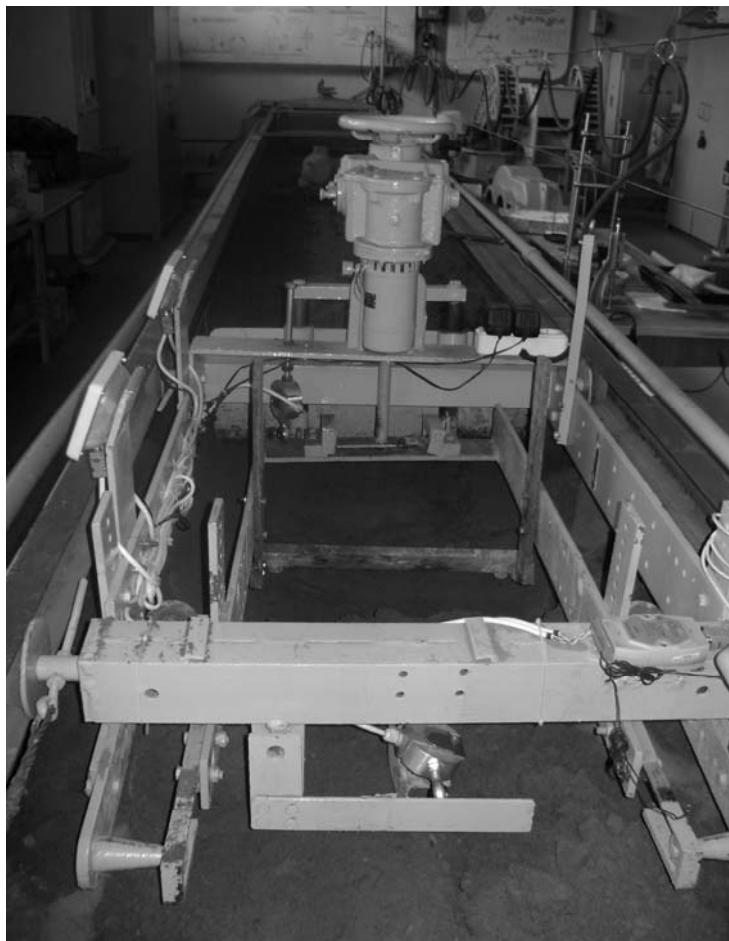
При сопоставлении экспериментальных значений с теоретическими возможны их расхождения по следующим причинам:

- из-за допущений, принятых в методике расчета и в расчетных схемах исследуемых процессов;
- из-за неизбежных погрешностей измерений при экспериментальных исследованиях;
- из-за неизбежных погрешностей при определении физико-механических свойств грунта.

На рисунке 2.17 приведены результаты, полученные теоретически (линии) и экспериментально (крестики), при толщине стружки  $h = 0,05$  м, ширине ножа  $B = 0,5$  м, постоянной высоте ножа  $H = 0,05$  м и при всех значениях угла резания. Кривой 1 и крестиками обозначены средние значения касательной составляющей сопротивления резанию. Кривые 2 и 3 получены при тех же условиях для максимальных и минимальных значений этой силы. Для сравнения приведены результаты, рассчитанные по методу подпорных стенок (кривая 4).

Таким образом, изложенные теоретические положения в достаточной степени отражают характер явлений, происходящих при резании грунта, что подтверждается хорошей сходимостью аналитических результатов с экспериментальными данными.

а)



б)



а – вид сзади; б – вид слева

Рисунок 2.16 – Стенд

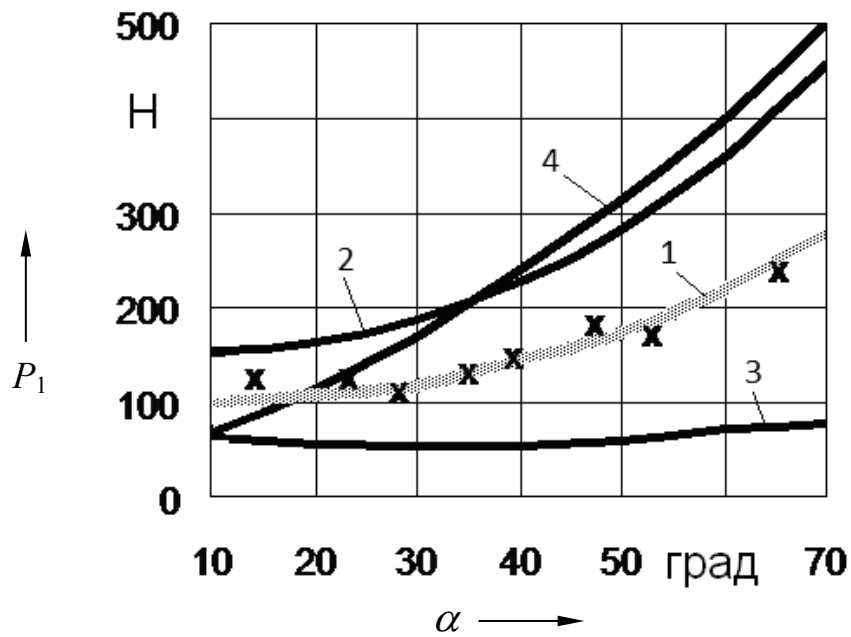


Рисунок 2.17 – Сопоставление аналитических и экспериментальных значений касательной составляющей сопротивления резанию

### ***Выводы***

Исследования позволили рассмотреть физические процессы, протекающие в грунте при его резании, и выявить факторы, оказывающие наиболее существенное влияние на эти процессы.

С помощью изложенных методов расчета резания грунта плоским ножом можно аналитически оценить эффективность рабочего органа и оптимизировать его параметры.

### **3 Сопротивление грунта резанию рабочим органом, повернутым под углом в плане (косое резание)**

#### ***3.1 Общие сведения***

Резание грунта ножом бывает лобовым и косым. Лобовым называется резание грунта ножом, режущая кромка которого расположена перпендикулярно направлению движения. Косым называется резание грунта ножом, повернутым под углом в плане. Эффективность косого резания грунта относительно мало изучена, а исследования, в основном экспериментальные, привели к достаточно противоречивым выводам.

Одним из первых уделил внимание изучению косого резания грунта академик В. П. Горячкин. Он отмечал: «Для перемещения плоского клина под углом требуется меньшая сила, чем при перемещении клина перпендикулярно к лезвию» [1]. Им предложена схема планов скоростей, дающая обоснование выбора направления сил трения для косого клина, в известной степени являющаяся допущением и не всегда подтверждаемая экспериментально [2].

Исследования З. Е. Гарбузова [41], проведенные на углях, свидетельствуют о неэффективности косого резания грунта, т. к. при повороте ножа удельное сопротивление резанию увеличивается.

Исследованиями косого копания грунта плоским рабочим органом, отвалами автогрейдера и бульдозера занимался И. А. Недорезов [42–45]. Он провел ряд экспериментальных исследований в грунтовом канале ЦНИИСа и на полигоне МАДИ и пришел к заключению об эффективности косого копания. Такой однозначный вывод справедлив для исследуемых рабочих органов, имеющих большую высоту. Однако это заключение нельзя переносить на все случаи резания грунта косым клином, особенно при малой высоте рабочего органа и резании грунта с высоким удельным сцеплением.

Несомненной заслугой И. А. Недорезова является то, что он впервые исследовал динамику косого резания грунта. Им установлено, что поворот рабочего органа в плане ведет к снижению динамических нагрузок на рабочий орган, что способствует повышению долговечности машины в целом.

Наиболее полные исследования косо́го резания грунта провели А. Н. Зеленин и Л. В. Красильников [46]. В ходе исследований ими сделано предположение, что энергоёмкость косо́го резания зависит от двух факторов – интенсивности схода грунта с рабочего органа и сил трения грунта вдоль отвала. В свою очередь, на эти факторы оказывают влияние угол поворота ножа в плане, угол резания, отношение высоты ножа к толщине стружки  $\lambda$  и условия резания (блокированное, полублокированное или свободное резание). Для оценки эффективности косо́го резания ими предложено использовать коэффициент  $\lambda$ . Так, например, при резании речного песка при угле резания  $\alpha = 90^\circ$  косо́е резание эффективно при коэффициенте  $\lambda > 1,75$ , а при угле резания  $\alpha = 45^\circ$  –  $\lambda > 4,75$ .

А. Н. Зелениным и Л. В. Красильниковым [46] отмечено, что косо́е полублокированное резание эффективно по сравнению с полублокированным лобовым независимо от значения коэффициента  $\lambda$ . Однако причины, по которым происходит значительное повышение эффективности косо́го полублокированного резания, авторами не установлены. Ими также определено, что движение срезанного грунта вверх по рабочему органу совпадает с направлением движения рабочего органа. Этот важный вывод сформулирован на основании экспериментальных исследований траектории движения грунта по поверхности косо́ поставленных рабочих органов при помощи флюгерных датчиков, соприкасающихся с грунтом [46].

### ***3.2 Особенности косо́го резания грунта***

Косо́е резание грунта имеет свои особенности. При повороте ножа в плане изменяются в направлении перемещения ножа геометрические размеры, влияющие на процесс резания: угол резания, длина ножа и ширина резания.

На рисунке 3.1 изображено положение ножа, повернутого под углом  $\varphi$  в плане, по отношению к его положению при лобовом резании. Для изменяемых размеров вводится индекс «штрих», а их значения будут называться текущими. Из схемы видно, что

$$B' = B \cos \varphi, \quad (3.1)$$

а также

$$b' = b / \cos \varphi, \quad (3.2)$$



Приравниваются правые части этих уравнений, тогда

$$l' = l \frac{\sin \alpha}{\sin \alpha'}. \quad (3.6)$$

Таким образом, текущие значения геометрических параметров ножа выражены через их действительные значения и угол  $\varphi$  поворота ножа в плане [47, 48].

Необходимо отметить, что угол  $\varphi_n$ , измеренный в плоскости ножа, можно выразить через углы  $\alpha$  и  $\alpha'$  с помощью (3.5):

$$\varphi_n = \arccos \frac{l}{l'} = \arccos \left( \frac{\sin \alpha'}{\sin \alpha} \right). \quad (3.7)$$

Далее рассматривается площадка сдвига и аналогичным образом выводятся зависимости, необходимые для дальнейших расчетов (рисунок 3.2).

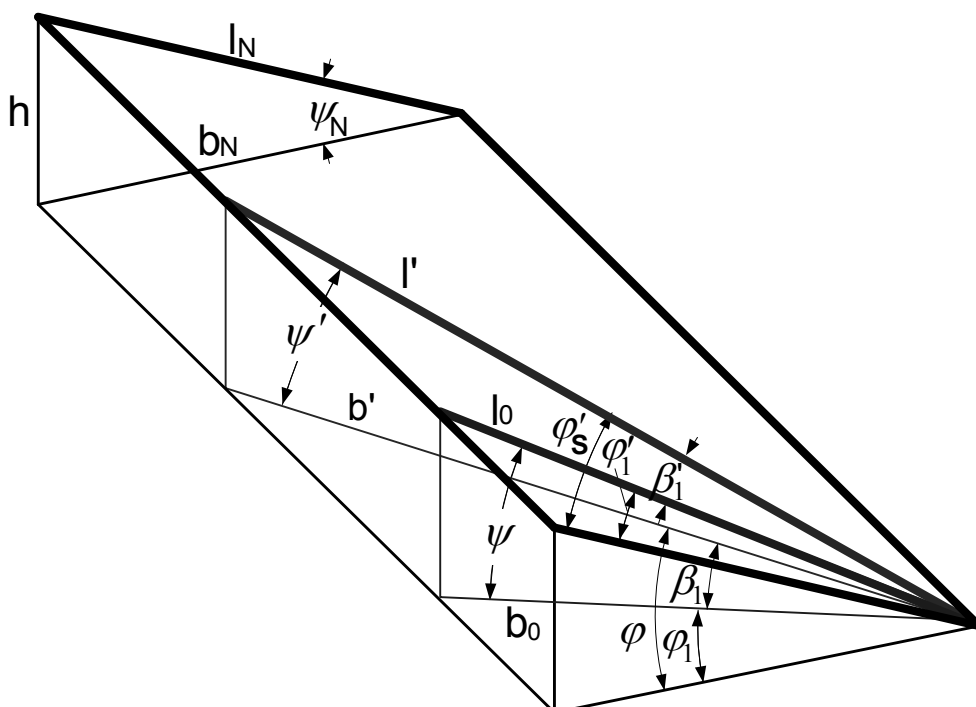


Рисунок 3.2 – Схема площадки сдвига



Используются аналогичные обозначения:  $l$  – для длины площадки сдвига,  $b$  – для ее проекции на чертежную плоскость с соответствующими индексами. Для параметров, измеренных в плоскости, совпадающей с направлением движения ножа и перпендикулярной поверхности разрабатываемого грунта, оставлен индекс «штрих». Для параметров, измеренных в плоскости, нормальной как к поверхности грунта, так и к режущей кромке ножа, используется индекс « $N$ », для параметров, измеренных в плоскости, совпадающей с направлением сдвига грунта по площадке скольжения и по-прежнему нормальной поверхности разрабатываемого массива, – индекс « $0$ ». Следует отметить, что величина  $h$  на рисунке 3.2 – это толщина срезаемой стружки.

Поскольку угол  $\varphi$  поворота ножа в плане является углом между отрезками  $b'$  и  $b_N$ , вводится обозначение  $\varphi_1$  для измерения угла между направлением, нормальным к режущей кромке, и направлением, совпадающим с направлением сдвига грунта по площадке скольжения. Угол  $\varphi_1$  измеряется между отрезками  $b_0$  и  $b_N$ . Угол между отрезками  $b'$  и  $b_0$ , обозначенный как  $\beta_1$ , – это угол между направлением, совпадающим с направлением сдвига грунта по площадке скольжения, и направлением движения ножа. Таким образом, углы, измеряемые в горизонтальной плоскости, связаны между собой соотношением

$$\varphi = \varphi_1 + \beta_1. \quad (3.8)$$

Аналогичные углы, измеренные между отрезками  $l_0$ ,  $l'$  и  $l_N$  в плоскости, совпадающей с площадкой сдвига, определяются следующим образом:

$$\varphi'_S = \varphi'_1 + \beta'_1. \quad (3.9)$$

Далее выводится соотношение между величинами приведенных выше углов, за основу принят угол  $\psi_N$ . Из схемы видно, что

$$h = l_N \sin \psi_N; \quad h = l_0 \sin \psi; \quad h = l' \sin \psi', \quad (3.10)$$

а также, что

$$h = b_N \operatorname{tg} \psi_N; \quad h = b_0 \operatorname{tg} \psi; \quad h = b' \operatorname{tg} \psi'. \quad (3.11)$$

Справедливы соотношения между отрезками  $b_0$ ,  $b'$  и  $b_N$

$$b_0 = \frac{b_N}{\cos \varphi_1}; \quad b' = \frac{b_N}{\cos \varphi}, \quad (3.12)$$

и соотношения между отрезками  $l_0$ ,  $l'$  и  $l_N$

$$l_0 = \frac{l_N}{\cos \varphi'_1}; \quad l' = \frac{l_N}{\cos \varphi'_S}. \quad (3.13)$$

Из схемы (см. рисунок 3.2) и уравнений (3.11) и (3.12)

$$\psi = \operatorname{arctg} \left( \frac{h}{b_0} \right) = \operatorname{arctg} (\operatorname{tg} \psi_N \cos \varphi_1); \quad (3.14)$$

$$\psi' = \operatorname{arctg} \left( \frac{h}{b'} \right) = \operatorname{arctg} (\operatorname{tg} \psi_N \cos \varphi). \quad (3.15)$$

Из (3.13) и (3.10) и схемы (см. рисунок 3.2) рассчитывается после преобразований угол

$$\varphi'_S = \arccos \frac{l_N}{l'} = \arccos \left( \frac{\sin \psi'}{\sin \psi_N} \right), \quad (3.16)$$

а также угол

$$\varphi'_1 = \arccos \frac{l_N}{l_0} = \arccos \left( \frac{\sin \psi}{\sin \psi_N} \right). \quad (3.17)$$

Таким образом, получены все основные соотношения между углами и отрезками, необходимые для дальнейших расчетов.

Далее составляется расчетная схема для определения веса грунта, перемещающегося по ножу в направлении  $s$ , с учетом отмеченных выше особенностей (рисунок 3.3).

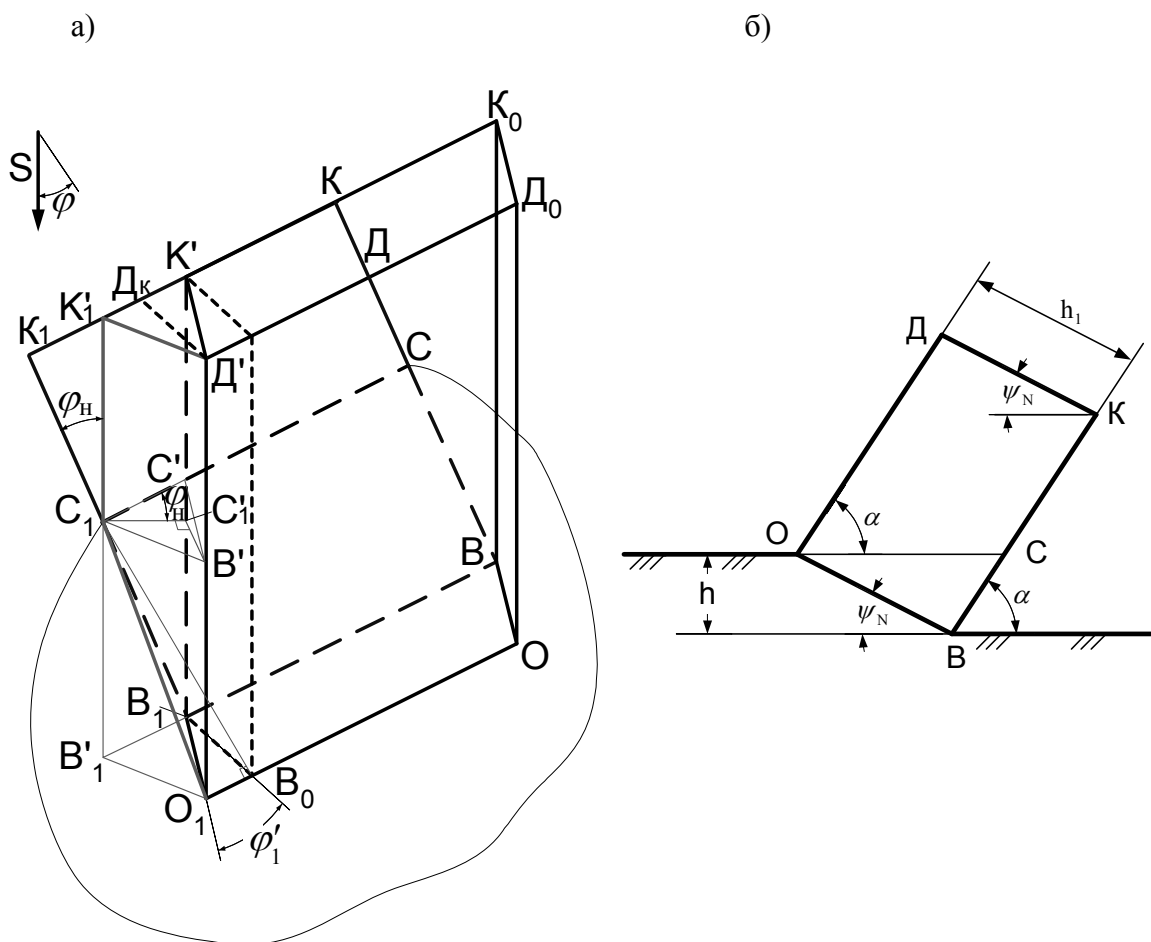


Рисунок 3.3 – Схема для расчета объема грунта, перемещаемого по ножу (а); поперечное сечение грунта (б)

Объем грунта, срезаемый режущей кромкой ножа, – это объем параллелепипеда с нижним  $OBB_1O_1$  и верхним  $D_0K_0K'D'$  основаниями. В плоскости, нормальной режущей кромке ножа, нижнее основание расположено под углом  $\psi_N$  к грунту. Принимается допущение, что и верхнее основание имеет тот же угол наклона. Это допущение следует из периодического отделения элементов стружки от грунта под этим углом в нормальной плоскости. Сцепление в грунте, перемещающемся по ножу, будет максимально разрушено именно на площадках, отделяющих такие элементы друг от друга. Поэтому и пересыпание через верхнюю кромку при резании вероятнее всего будет осуществляться по таким площадкам.

Необходимо найти объем рассматриваемого параллелепипеда.

Площадь параллелограмма  $BK_0K'B_1$  будет равна площади поверхности рабочего органа:

$$S_H = Bl. \quad (3.18)$$

Толщина рассматриваемого параллелепипеда  $h_1$  определится из схемы на рисунке 3.3 следующим образом:

$$h_1 = h \frac{\sin(\alpha + \psi_N)}{\sin \psi_N}. \quad (3.19)$$

Тогда объем параллелепипеда

$$V' = S_H h_1 = Blh \frac{\sin(\alpha + \psi_N)}{\sin \psi_N}. \quad (3.20)$$

Часть объема параллелепипеда, расположенная вне ножа, будет осыпаться по ведомой боковой кромке ножа (отрезок  $KB$ ). Элементы стружки, отделяемые при сдвиге от грунта, представляют собой тонкие пластинки, обладающие относительно высоким внутренним сцеплением в отличие от сцепления между пластинками. Поэтому можно принять для определенности допущение, что осыпание грунта по ведомой грани (отрезок  $KB$ ) будет происходить в вертикальной плоскости. В этом случае отсекаемый этим отрезком объем грунта при условном его перемещении на свободную поверхность ножа (без учета треугольной призмы грунта с основанием  $D'K'K'_1$ ) полностью заполняет ее. Объем грунта, реально перемещающийся по ножу, можно представить как

$$V = V' - V_{cv} + V_{\delta}, \quad (3.21)$$

где  $V_{cv}$  – объем части параллелепипеда, осыпавшийся через ведомую боковую кромку;

$V_{\delta}$  – объем треугольной призмы грунта, срезаемый лидирующей боковой кромкой.

Объем осыпавшейся части параллелепипеда определяется исходя из свободной поверхности ножа  $K'K_1B_1$ , которую необходимо корректировать с учетом того, что сдвиг грунта происходит под углом  $\varphi'_1$ , измеренным в

плоскости площадки сдвига.

Длину отрезка  $K'D_K$ , равную длине отрезка  $B_0O_1$ , с учетом схемы на рисунке 3.3 можно найти следующим образом:

$$l_{K'D_K} = l_{B_0O_1} = l_0 \sin \varphi'_1, \quad (3.22)$$

где значения  $l_0$  и  $\varphi'_1$  принимаются по (3.13) и (3.17).

Учитывая, что

$$l_{K'K_1} = l \operatorname{tg} \varphi_H, \quad (3.23)$$

объем  $V_{CB}$  определяется из формулы

$$V_{CB} = \frac{1}{2} \left( l_{K'K_1} - \frac{1}{2} l_{K'D_K} \right) \frac{h_1}{\operatorname{tg} \varphi_H}. \quad (3.24)$$

Далее находят объем  $V_{\bar{o}}$  призмы грунта, срезаемого боковой кромкой. Отрезок  $K_1'C_1$  продляется до точки  $B_1'$  так, чтобы призма с основаниями  $K'K_1D'$  и  $B_1B_1'O_1$  стала полной. Следует отметить при этом, что объем пирамиды  $B_1B_1'O_1C_1$ , дополняющий призму с боковым ребром  $B_1C'$  до полной, составляет 1/3 ее объема.

Тогда

$$V_{\bar{o}} = S_{TP} \left( l_{B_1K'} - \frac{1}{3} l_{B_1C'} \right) = S_{TP} \left( \frac{l}{\cos \varphi_H} - \frac{l_{B_1C'}}{3} \right), \quad (3.25)$$

где  $S_{TP}$  – площадь перпендикулярного сечения призмы.

Из схемы на рисунке 3.5 видно, что отрезок  $B_1C_1$  равен отрезку  $BC$ , тогда

$$l_{B_1C'} = \frac{l_{BC}}{\cos \varphi_H} = \frac{h}{\sin \alpha \cos \varphi_H}. \quad (3.26)$$

Из этой же схемы

$$l_{C'C_1} = l_{BC} \sin \varphi_H = \frac{h \sin \varphi_H}{\sin \alpha}. \quad (3.27)$$

Высота перпендикулярного сечения, имеющая треугольную форму, равна толщине параллелепипеда  $h_1$  (см. (3.19)).

Тогда

$$S_{TP} = \frac{1}{2} l_{C'C_1} h_1. \quad (3.28)$$

Таким образом, определены все составляющие уравнения (3.21).

Рассмотренный выше случай является наиболее типичным, но существует еще несколько случаев движения грунта по ножу. Так, при совмещении точки  $K'$  с точкой  $K$  через верхнюю кромку ножа будет пересыпаться только грунт, срезаемый лидирующей боковой кромкой.

При выполнении условия

$$\varphi_n \geq \arctg \frac{B}{l} \quad (3.29)$$

грунт, срезаемый лобовой кромкой, будет пересыпаться только через боковую кромку.

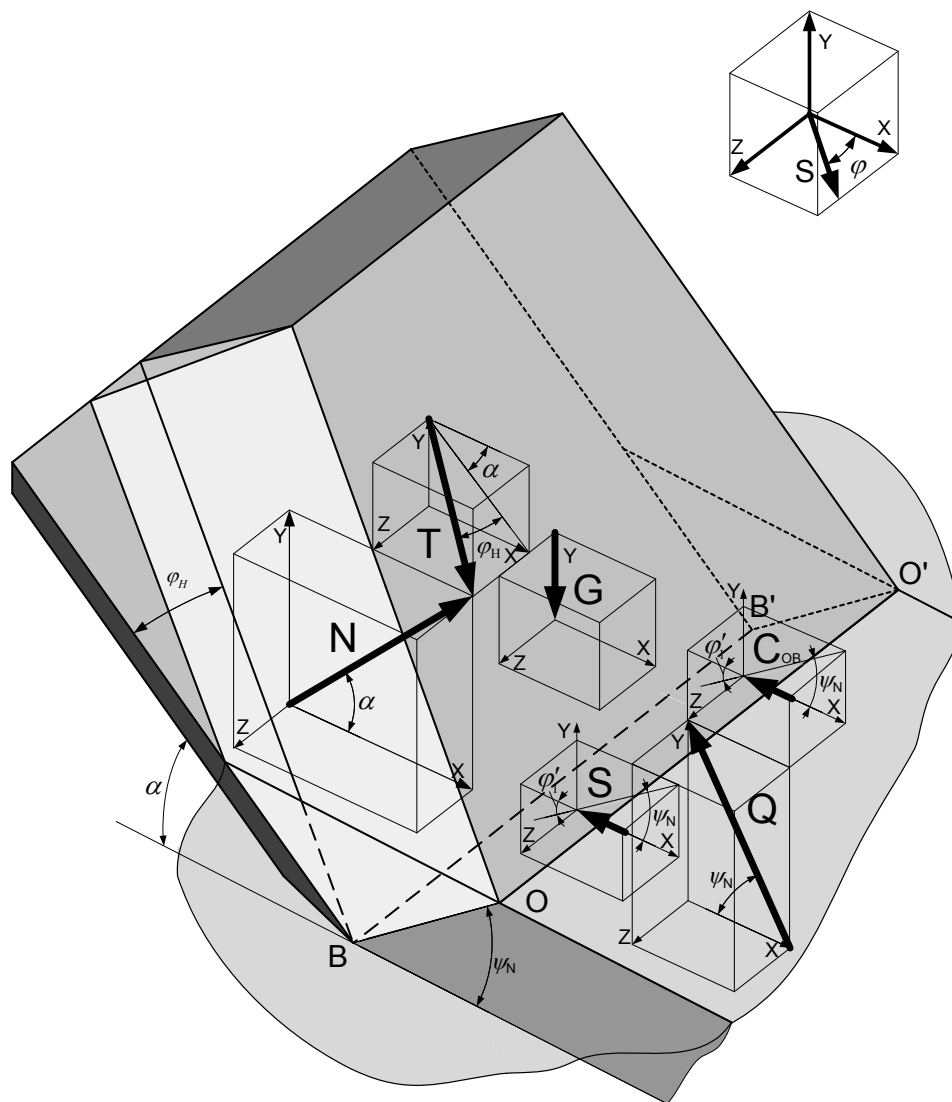
Возможны и другие промежуточные варианты движения грунта по ножу. После преобразования изложенных выше уравнений становится возможным определение веса грунта, перемещаемого по ножу, для всех случаев [48].

### ***3.3 Определение сопротивлений при косом резании грунта***

*Определение угла сдвига.* Для расчета угла сдвига необходимо знать величину приведенного давления, действующего на площадку сдвига (см. раздел 1). Для этого следует найти силы, действующие на поверхность площадки сдвига  $OBV_1O_1$ .

Далее рассматриваются силы, действующие на грунт, движущийся по ножу (рисунок 3.4), без учета сопротивлений по боковым кромкам ножа, т. к. эти сопротивления оказывают локальное воздействие на грунт только по торцам ножа и поэтому почти не изменяют граничные условия на поверхности площадки сдвига  $OBV_1O_1$ .

а)



б)

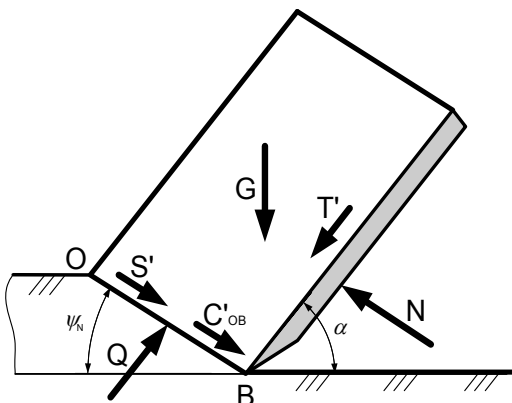
а – полная; б – в плоскости  $XOY$ 

Рисунок 3.4 – Расчетная схема сил

На призму грунта с нормальным сечением  $OBKD$  действует прежде всего собственный вес

$$G = V\rho_2g, \quad (3.30)$$

где  $\rho_2$  – плотность грунта, перемещаемого по ножу;  
 $g$  – гравитационное ускорение.

Со стороны ножа действуют нормальная сила  $N$  и сила трения

$$T = N \operatorname{tg}\omega, \quad (3.31)$$

где  $\omega$  – угол внешнего трения.

Сила  $N$  расположена в плоскости  $XOY$ , а сила  $T$  направлена против движения грунта по ножу. В плоскости  $XOY$  будет расположена ее проекция

$$T' = T \cos \varphi_H = N \operatorname{tg}\omega \cos \varphi_H. \quad (3.32)$$

Со стороны площадки сдвига  $OBV_1O_1$  на перемещаемый по ножу грунт действуют нормальная сила  $Q$ , сила трения  $S$  и сила  $C_{OB}$ , затрачиваемая на преодоление сцепления по площадке сдвига.

Нормальная сила  $Q$  также расположена в плоскости  $XOY$ . Сила трения  $S$  и сила  $C_{OB}$  будут действовать в направлении, противоположном направлению происходящего под углом  $\varphi'_1$  сдвига грунта по площадке  $OBV_1O_1$ .

Сила трения

$$S = Q \operatorname{tg}\rho. \quad (3.33)$$

Сила  $C_{OB}$  определится по формуле

$$C_{OB} = S_n c = \frac{Bch}{\sin \psi_N}, \quad (3.34)$$

где  $S_n$  – площадь лобовой площадки сдвига.

В плоскости  $XOY$  (см. рисунок 3.4, б) будут находиться проекции  $S'$  и  $C'_{OB}$  рассмотренных выше сил:

$$S' = S \cos \varphi'_1 = Q \operatorname{tg}\rho \cos \varphi'_1;$$



$$C'_{OB} = C_{OB} \cos \varphi'_1 = \frac{Bch}{\sin \psi_N} \cos \varphi'_1. \quad (3.35)$$

Уравнения проекций сил, действующих на перемещаемый по ножу грунт, на координатные оси  $X$ ,  $Y$  и  $Z$  (ось  $Z$  расположена вдоль режущей кромки ножа):

$$\left. \begin{aligned} \Sigma X &= N \cdot \sin \alpha + T' \cdot \cos \alpha - Q \cdot \sin \psi_N - S' \cdot \cos \psi_N - C'_{OB} \cdot \cos \psi_N = 0; \\ \Sigma Y &= N \cdot \cos \alpha - T' \cdot \sin \alpha - G + Q \cdot \cos \psi_N - S' \cdot \sin \psi_N - C'_{OB} \cdot \sin \psi_N = 0; \\ \Sigma Z &= T \cdot \sin \varphi_H - S \cdot \sin \varphi'_1 - C_{OB} \cdot \sin \varphi'_1 = 0. \end{aligned} \right\} (3.36)$$

Силы трения  $T$  и  $S$  выразятся через нормальные силы  $N$  и  $Q$ , а также сгруппируются элементы системы уравнений, тогда

$$\left. \begin{aligned} N(\sin \alpha + \operatorname{tg} \omega \cos \varphi_H \cos \alpha) - Q(\sin \psi_N + \\ + \operatorname{tg} \rho \cos \varphi'_1 \cos \psi_N) - C_{OB} \cos \varphi'_1 \cos \psi_N &= 0; \\ N(\cos \alpha - \operatorname{tg} \omega \cos \varphi_H \sin \alpha) - G + Q(\cos \psi_N - \\ - \operatorname{tg} \rho \cos \varphi'_1 \sin \psi_N) - C_{OB} \cos \varphi'_1 \sin \psi_N &= 0; \\ N \operatorname{tg} \omega \sin \varphi_H - Q \operatorname{tg} \rho \sin \varphi'_1 - C_{OB} \sin \varphi'_1 &= 0. \end{aligned} \right\} (3.37)$$

Далее вводятся обозначения:

$$\begin{aligned} K_1 &= \sin \alpha + \operatorname{tg} \omega \cos \alpha \cos \varphi_H; & M_1 &= \sin \psi_N + \operatorname{tg} \rho \cos \psi_N \cos \varphi'_1; \\ K_2 &= \cos \alpha - \operatorname{tg} \omega \sin \alpha \cos \varphi_H; & M_2 &= \cos \psi_N - \operatorname{tg} \rho \sin \psi_N \cos \varphi'_1. \end{aligned} \quad (3.38)$$

Тогда

$$\left. \begin{aligned} NK_1 - QM_1 - C_{OB} \cos \varphi'_1 \cos \psi_N &= 0; \\ NK_2 - G + QM_2 - C_{OB} \cos \varphi'_1 \sin \psi_N &= 0; \\ N \operatorname{tg} \omega \sin \varphi_H - \sin \varphi'_1 (Q \operatorname{tg} \rho + C_{OB}) &= 0. \end{aligned} \right\} (3.39)$$

В эту систему входят три неизвестных – силы  $N$ ,  $Q$  и угол  $\varphi'_1$ . Поскольку система состоит из трех уравнений и содержит три неизвестных, то такая система имеет решение.

Из третьего уравнения системы (3.39)

$$\varphi'_1 = \arcsin \frac{N \operatorname{tg} \omega \sin \varphi_H}{Q \operatorname{tg} \rho + C_{OB}}. \quad (3.40)$$

Из первого уравнения системы (3.39)

$$N = \frac{QM_1 + C_{OB} \cos \varphi'_1 \cos \psi_N}{K_1}. \quad (3.41)$$

Это значение подставляется во второе уравнение (3.39). Таким образом, после преобразований

$$QM_1K_2 + C_{OB} \cos \varphi'_1 \cos \psi_N K_2 - GK_1 + QM_2K_1 - C_{OB} \cos \varphi'_1 \sin \psi_N K_1 = 0,$$

откуда

$$Q = \frac{GK_1 + C_{OB} \cos \varphi'_1 (K_1 \sin \psi_N - K_2 \cos \psi_N)}{M_1K_2 + M_2K_1}. \quad (3.42)$$

Поскольку решение нельзя представить в замкнутом виде, систему уравнений (3.39) необходимо решать численными методами. Задавшись предварительной величиной угла  $\varphi'_1$ , по (3.41) и (3.42) следует определить значения сил  $N$  и  $Q$  и подставить эти значения в (3.40). Если вычисленное по (3.40) значение угла  $\varphi'_1$  отличается от заданного, то нужно соответствующим образом задаться новым значением угла  $\varphi'_1$  и повторять процесс вычислений до получения результата с требуемой точностью. По завершении расчетов станут известными значения угла  $\varphi'_1$  и сил  $N$  и  $Q$ , а следовательно, и зависящих от них сил трения  $T$  и  $S$ .

Для определения приведенного давления  $q$ , действующего на площадку сдвига, используется схема, изображенная на рисунке 3.5, на которой действительные давления от сил  $Q$ ,  $S$  и  $C_{OB}$  обозначены соответственно как  $q'$ ,  $s$  и  $c$ . Следует отметить при этом, что  $c$  будет являться удельным сцеплением грунта, как видно из (3.34). Согласно схеме

$$q = \frac{q' + H}{\cos \rho} = \frac{q'}{\cos \rho} + \frac{c}{\sin \rho}. \quad (3.43)$$

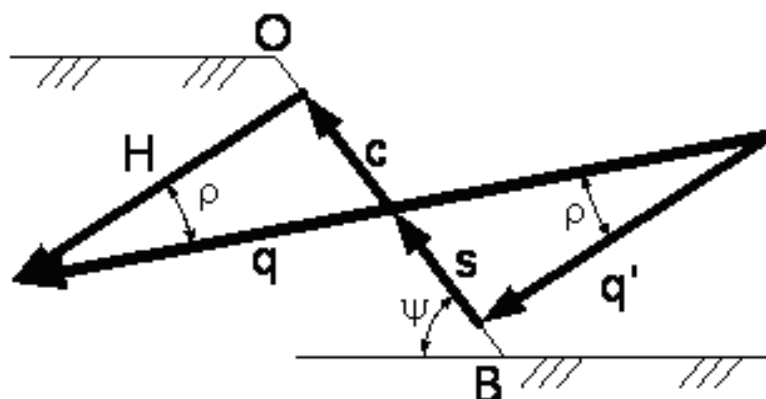


Рисунок 3.5 – Схема к определению приведенного давления

При этом

$$q' = \frac{Q}{S_{\lambda}} = \frac{Q}{Bh} \sin \psi_N. \quad (3.44)$$

Таким образом, изложенная методика расчета позволяет получить величину приведенного давления, действующего на площадку сдвига.

Устойчивость откоса будет минимальной, когда приведенное давление  $q$  наклонено к вершине откоса под углом внутреннего трения [28], что бывает в момент сдвига грунта. При косом резании это происходит в направлении, совпадающем с направлением сдвига грунта. Поэтому прежде всего необходимо связать угол сдвига, измеренный в плоскости, нормальной к поверхности площадки сдвига и отклоненной от нормали к режущей кромке под углом  $\varphi'_1$ , с нормальным углом сдвига  $\psi_N$ . Для этого через точку  $O$  проводится нормаль  $OP$  к поверхности  $OBB_1O_1$ , являющейся площадкой сдвига (рисунок 3.6). Через эту нормаль проводится секущая плоскость, перпендикулярная отрезку  $BB_1$  – режущей кромке ножа. Таким образом, получится прямоугольный треугольник с прямым углом  $POB$ . Далее секущая плоскость поворачивается на угол  $\varphi'_1$ , при этом образуется треугольник  $POB'$ . Следует отметить, что плоскость по-прежнему проходит через нормаль  $OP$ , т. е. она остается перпендикулярной поверхности сдвига  $OBB_1O_1$ . При этом длина отрезка  $l_p$ , расположенного на поверхности сдвига, равна длине отрезка  $l_0$  (см. (3.13)). Новое обозначение  $l_p$  введено лишь по той причине, что секущая плоскость на рисунке 3.6 перпендикулярна поверхности сдвига  $OBB_1O_1$  в отличие от

секущей плоскости на рисунке 3.2, проходящей через такой же отрезок, но перпендикулярной основанию, расположенному в горизонтальной плоскости. На рисунке 3.6 секущая плоскость, перпендикулярная основанию плоскости, представлена треугольником  $OO'B'$ .

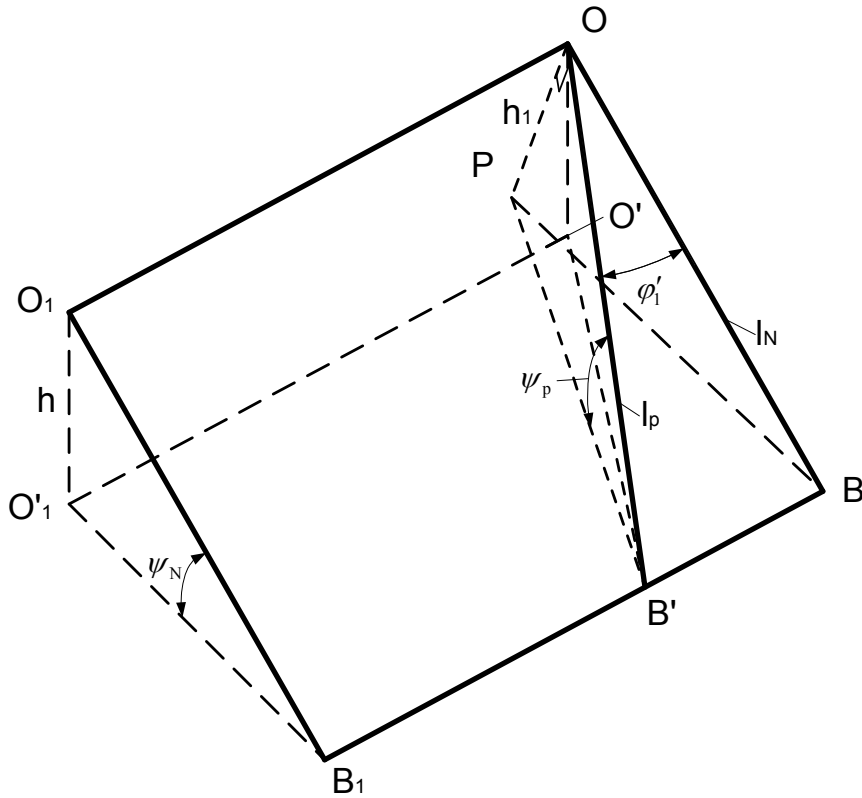


Рисунок 3.6 – Схема для определения расчетного угла сдвига

Таким образом,

$$l_p = \frac{l_N}{\cos \phi_1'}$$

Из схемы видно, что из треугольников  $OPB$  и  $OPB'$  соответственно

$$h_1 = l_N \operatorname{tg} \psi_N; \quad h_1 = l_p \operatorname{tg} \psi_p = l_N \frac{\operatorname{tg} \psi_p}{\cos \phi_1'}, \quad (3.45)$$

т. к. углы  $POB$  и  $POB'$  между нормалью  $PO$  и любым лучом, проведенным с точки  $O$  в плоскости, перпендикулярной нормали, являются прямыми.

Из (3.45) окончательно

$$\psi_p = \operatorname{arctg}(\operatorname{tg} \psi_N \cos \varphi_1'). \quad (3.46)$$

Данное уравнение позволяет связать расчетный угол сдвига  $\psi_p$  с углом сдвига  $\psi_N$ , измеренным в плоскости, нормальной к режущей кромке ножа.

Для определения расчетного угла сдвига по граничным условиям используются (1.32)–(1.35), которые решаются совместно с (3.43) по следующему алгоритму:

- выбираются начальные значения угла сдвига и угла направления сдвига, вычисляются размеры перемещаемого по ножу грунта;
- вычисляется вес перемещаемого по ножу грунта, рассматриваются условия его равновесия, из системы трех уравнений вычисляется расчетное значение угла направления сдвига грунта;
- сравнивается полученное расчетное значение угла направления сдвига с начальным значением и, если это расхождение больше принятого, соответствующим образом изменяется начальное значение этого угла, процесс вычислений повторяется до получения результата с требуемой точностью;
- определяются силы, возникающие в процессе резания, давление, действующее на площадку сдвига, и расчетное значение угла сдвига;
- сравнивается расчетное значение угла сдвига с начальным значением, при их расхождении корректируется начальное значение угла сдвига и повторяются вычисления до совпадения с требуемой точностью, при этом для каждой итерации повторяются вычисления предыдущего цикла для нахождения угла направления сдвига;
- определяются геометрические и силовые параметры, характеризующие процесс косоугольного резания.

Как видно из приведенного алгоритма, сами расчеты достаточно трудоемки и почти неосуществимы без применения ЭВМ.

*Определение сопротивлений при косом резании грунта.* При известной величине угла сдвига значения отмеченных выше сил определены. Для расчета составляющих сопротивления резанию из этих сил достаточно использовать только силы  $N$  и  $T$ , действующие на нож. Эти силы ориентированы по-разному: сила  $N$  направлена перпендикулярно плоскости ножа, а сила  $T$  расположена в плоскости ножа и действует в направлении движения грунта по ножу, совпадающем с направлением перемещения ножа.

Силу  $N$  необходимо разложить по координатным осям  $X$ ,  $Y$  и  $Z$ , изображенным на рисунке 3.4.

Нормальная проекция  $N_Y$  силы  $N$  определяется как

$$N_Y = N \cos \alpha. \quad (3.47)$$

Горизонтальная проекция этой силы

$$N_{XZ} = N \sin \alpha. \quad (3.48)$$

Угол между этой силой и осью  $X$  является углом  $\varphi$  поворота ножа в плане. Поэтому касательная проекция  $N_X$  силы  $N$

$$N_X = N_{XZ} \cos \varphi = N \sin \alpha \cos \varphi. \quad (3.49)$$

Аналогичным образом определяется и поперечная проекция  $N_Z$ :

$$N_Z = N_{XZ} \sin \varphi = N \sin \alpha \sin \varphi. \quad (3.50)$$

Далее непосредственно рассчитывается сопротивление резанию [47, 48]. В момент сдвига сопротивление будет максимальным, и его составляющие определяются следующим образом:

$$\left. \begin{aligned} P_1^{\max} &= N_X + T \cos \alpha' = N \sin \alpha \cos \varphi + N \operatorname{tg} \omega \cos \alpha' = \\ &= N (\sin \alpha \cos \varphi + \operatorname{tg} \omega \cos \alpha'); \\ P_2^{\max} &= N_Y - T \sin \alpha' = N \cos \alpha - N \operatorname{tg} \omega \cos \alpha' = N (\cos \alpha - \operatorname{tg} \omega \cos \alpha'); \\ P_3^{\max} &= N_Z = N \sin \alpha \sin \varphi. \end{aligned} \right\} \quad (3.51)$$

При сдвиге разрушается сцепление на площадке сдвига, что приводит к снижению значений сил  $N$  и  $T$ , равно как и сил  $Q$  и  $S$ . При этом следует учесть, что грунт движется по площадке сдвига в направлении, сформированном в момент сдвига. Поэтому величину силы  $Q_{\min}$  можно найти из (3.42) при  $C_{OB} = 0$ :

$$Q_{\min} = \frac{GK_1}{M_1K_2 + M_2K_1}, \quad (3.52)$$

а величину силы  $N_{\min}$  – из (3.41) с учетом значения  $Q_{\min}$ :

$$N_{\min} = \frac{Q_{\min} M_1}{K_1}. \quad (3.53)$$

Сила трения  $T_{\min}$ , действующая после сдвига:

$$T_{\min} = N_{\min} \operatorname{tg} \omega. \quad (3.54)$$

Составляющие сопротивления резанию, действующие непосредственно после сдвига, можно получить из (3.51), подставляя в них значения  $N_{\min}$  и  $T_{\min}$  из (3.53) и (3.54):

$$\left. \begin{aligned} P_1^{\min} &= N_{\min} (\sin \alpha \cos \varphi + \operatorname{tg} \omega \cos \alpha'); \\ P_2^{\min} &= N_{\min} (\cos \alpha - \operatorname{tg} \omega \cos \alpha'); \\ P_3^{\min} &= N_{\min} \sin \alpha \sin \varphi. \end{aligned} \right\} \quad (3.55)$$

Максимальная величина амплитуды колебаний составляющих будет соответствовать большому сдвигу:

$$\left. \begin{aligned} \Delta P_1 &= P_1^{\max} - P_1^{\min}; \\ \Delta P_2 &= P_2^{\max} - P_2^{\min}; \\ \Delta P_3 &= P_3^{\max} - P_3^{\min}. \end{aligned} \right\} \quad (3.56)$$

Таким образом, определены силовые параметры, характеризующие процесс косоугольного резания.

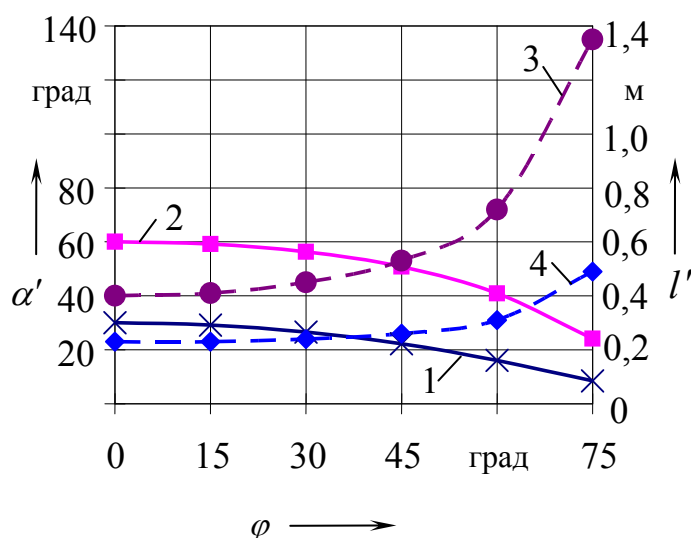
### ***3.4 Исследования влияния поворота ножа на резание грунта***

Численные решения определялись для грунта со следующими свойствами: плотность грунта  $\rho_2 = 1,7 \text{ т/м}^3$ ; угол внутреннего трения  $\rho = 28^\circ$ ; угол внешнего трения  $\omega = 25^\circ$ ; удельное сцепление грунта  $c = 4 \text{ кПа}$ . Эти значения соответствуют параметрам грунта лабораторной установки кафедры СДПТМиО Белорусско-Российского университета.

Проведены исследования при углах резания  $\alpha = 30^\circ$  и  $\alpha = 60^\circ$ , при одинаковой высоте ножа  $H_{RO} = 0,2$  м, ширине ножа  $B = 0,2$  м и толщине стружки  $h = 0,02$  м. Длина ножа связана с высотой и углом резания зависимостью  $l = \frac{H_{RO}}{\sin \alpha}$ . Угол  $\varphi$  поворота ножа в плане изменится от  $0^\circ$  (лобовое резание) до  $75^\circ$ .

Поскольку при повороте ножа в плане ширина резания уменьшается, то для оценки эффективности косого резания и сопоставления его с лобовым резанием следует использовать удельные показатели. В качестве такого показателя чаще выступает удельное сопротивление резанию, представляющее собой отношение силы сопротивления резанию к площади вырезаемой стружки [1]. Этот показатель применяется далее.

Изменение угла резания и длины ножа в направлении движения видно на рисунке 3.7. Угол резания наиболее интенсивно изменяется при исходном значении ( $\alpha = 60^\circ$ ), а длина ножа наиболее интенсивно увеличивается при  $\alpha = 30^\circ$ . Это неизбежно приводит к изменению силовых параметров и удельного сопротивления резанию.



1, 3 – при  $\alpha = 30^\circ$ ; 2, 4 – при  $\alpha = 60^\circ$

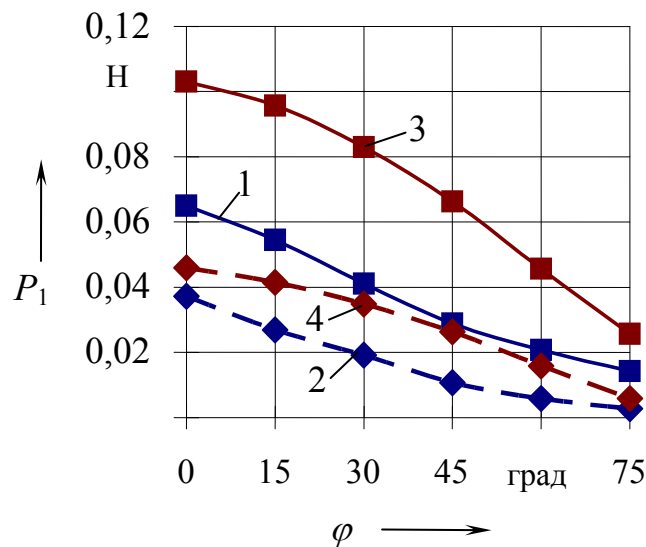
Рисунок 3.7 – Влияние угла поворота ножа в плане  $\varphi$  на угол резания  $\alpha'$  (кривые 1 и 2) и длину ножа  $l'$  (кривые 3 и 4) в направлении движения ножа

В связи с этим рассматривается изменение экстремальных значений касательной, нормальной и боковой составляющих сопротивления

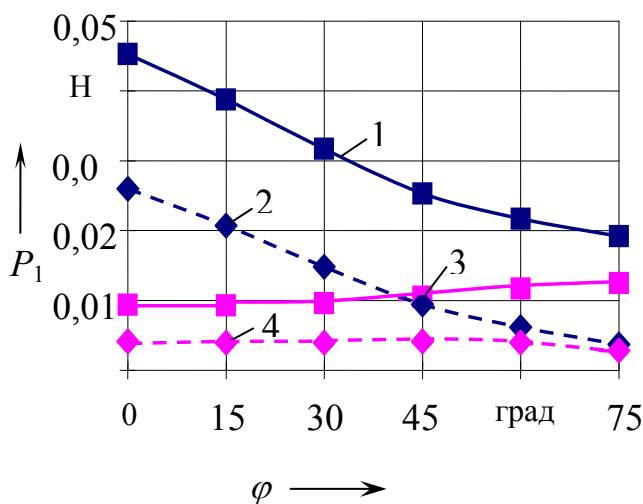


резанию для этих ножей (рисунок 3.8). Из рисунка видно, что при повороте ножа касательная составляющая интенсивно уменьшается (особенно при  $\alpha = 60^\circ$ ), нормальная составляющая при  $\alpha = 30^\circ$  уменьшается менее интенсивно, а при  $\alpha = 60^\circ$  даже несколько увеличивается. Боковая составляющая для обоих ножей сначала увеличивается, а затем уменьшается.

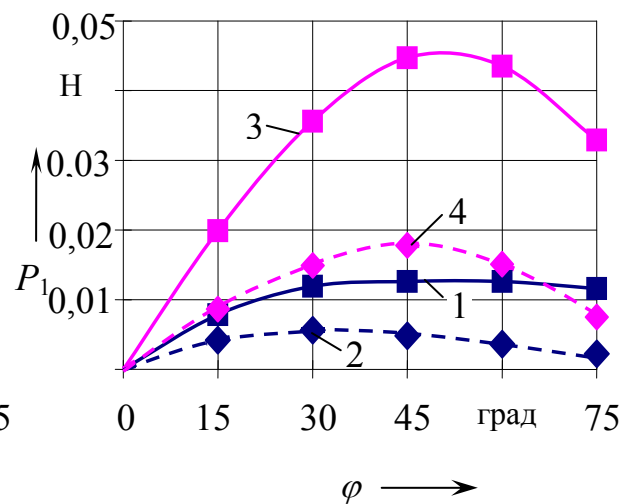
а)



б)



в)



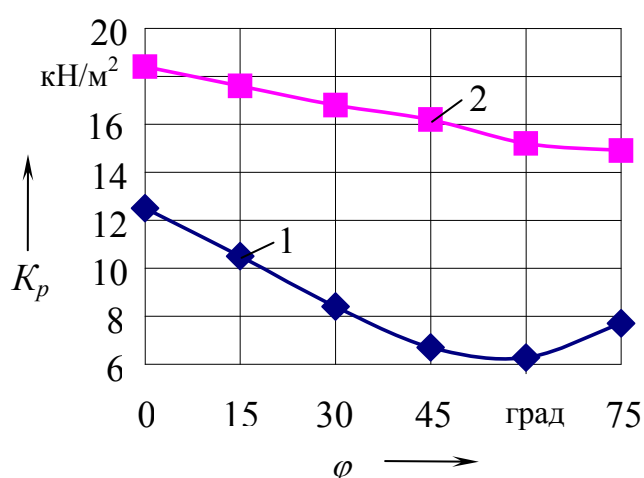
1, 2 – при  $\alpha = 30^\circ$ ; 3, 4 – при  $\alpha = 60^\circ$

Рисунок 3.8 – Зависимость максимальных (кривые 1 и 3) и минимальных (кривые 2 и 4) значений касательной (а), нормальной (б) и боковой (в) составляющих сопротивления резанию от угла поворота ножа в плане  $\varphi$

Поскольку составляющие сопротивления резанию не могут являться критерием оценки эффективности косого резания, анализируется удельный показатель  $K_p$  (рисунок 3.9), пересчитанный по среднему значению касательной составляющей сопротивления резанию:

$$K_p = \frac{P_1^{\max} + P_1^{\min}}{2S}, \quad (3.57)$$

где  $S = B'h$ .



1 – при  $\alpha = 30^\circ$ ; 2 – при  $\alpha = 60^\circ$

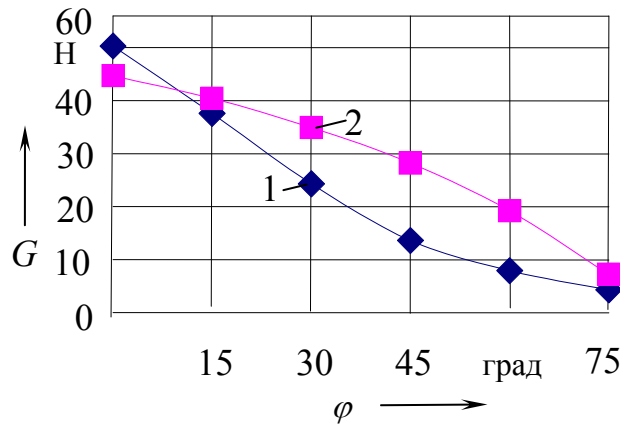
Рисунок 3.9 – Влияние угла поворота ножа в плане  $\varphi$  на удельное сопротивление резанию  $K_p$

Из рисунка 3.9 видно, что поворот ножа в плане при угле резания  $\alpha = 60^\circ$  является эффективным во всем диапазоне изменения угла  $\varphi$  (от 0 до  $75^\circ$ ), а при  $\alpha = 30^\circ$  — только до  $\varphi \approx 60^\circ$ . Дальнейший поворот ножа приводит к увеличению удельного сопротивления резанию. Эти результаты хорошо согласуются с исследованиями Л. В. Красильникова [46].

Характер изменения силовых параметров во многом обусловлен весом грунта, перемещаемым по ножу (рисунок 3.10).

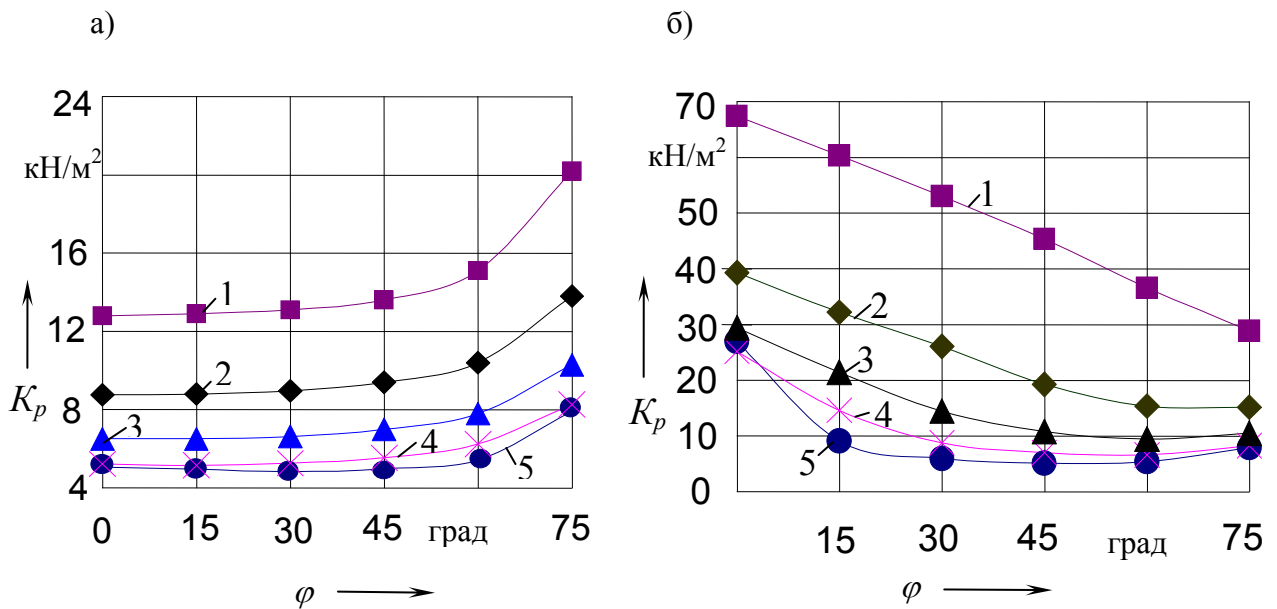
*Влияние угла резания.* Влияние угла резания исследуется при разной высоте рабочего органа (0,05 и 0,4 м). Угол резания изменялся в пределах  $15\text{--}75^\circ$ . Значения остальных геометрических размеров ножа, толщины стружки и физико-механических свойств грунта оставлены без изменений.

Выбор двух значений высоты рабочего органа основывается на экспериментальных исследованиях [46], которые показали, что эффективность косого резания во многом зависит от этого параметра. В этом можно убедиться, проанализировав представленные графически результаты расчетов (рисунок 3.11).



1 – при  $\alpha = 30^\circ$ ; 2 – при  $\alpha = 60^\circ$

Рисунок 3.10 – Влияние угла поворота ножа в плане  $\varphi$  на вес грунта, перемещаемого по ножу



1 –  $\alpha = 75^\circ$ ; 2 –  $\alpha = 60^\circ$ ; 3 –  $\alpha = 45^\circ$ ; 4 –  $\alpha = 30^\circ$ ; 5 –  $\alpha = 15^\circ$

Рисунок 3.11 – Влияние угла поворота ножа в плане  $\varphi$  на удельное сопротивление резанию  $K_p$  при высоте рабочего органа 0,05 м (а) и 0,4 м (б)

Из рисунка 3.11, а видно, что при малой высоте ножа при его повороте в плане удельное сопротивление резанию увеличивается почти во всем диапазоне углов резания, за исключением малых значений ( $\alpha = 15^\circ$ ).

Иные результаты получены при большой высоте ножа (см. рисунок 3.11, б). Поворот ножа в плане приводит к снижению удельного сопротивления резанию, при этом при малых углах резания кривые  $K_p = f(\varphi)$  имеют точку минимума. С увеличением угла резания минимальное значение удельного сопротивления резанию смещается в сторону больших значений угла поворота ножа в плане. Так, при  $\alpha = 15^\circ$  удельное сопротивление резанию будет минимальным при  $\varphi = 45^\circ$ , при  $\alpha = 30^\circ$  – при  $\varphi = 50^\circ$ , а при  $\alpha = 45^\circ$  – уже при  $\varphi = 60^\circ$ .

Следует отметить, что при  $\varphi = 0^\circ$  (лобовое резание) удельное сопротивление при угле резания  $\alpha = 15^\circ$  будет несколько выше, чем при  $\alpha = 30^\circ$  [49]. При повороте ножа более интенсивное снижение удельного сопротивления резанию при  $\alpha = 15^\circ$  приводит к исчезновению такой особенности.

*Влияние высоты ножа.* Влияние высоты ножа (рисунок 3.12) рассматривается для двух значений угла резания:  $\alpha = 30^\circ$  и  $\alpha = 60^\circ$ . Как в том, так и в другом случае характер изменения удельного сопротивления резанию одинаков.

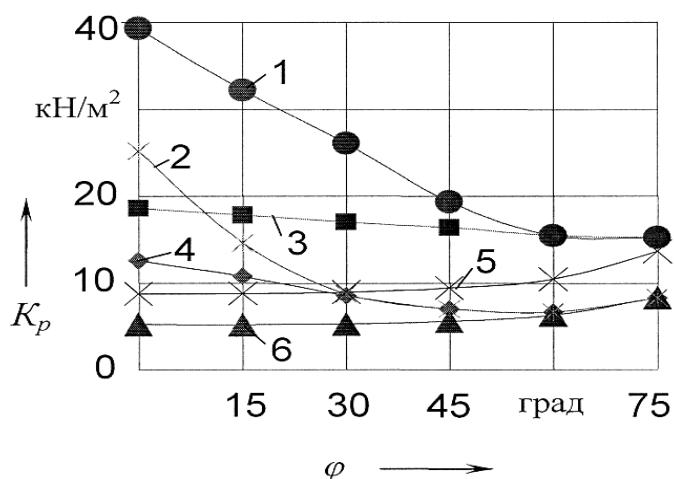


Рисунок 3.12 – Влияние угла поворота ножа в плане  $\varphi$  на удельное сопротивление резанию  $K_p$  при высоте рабочего органа  $H_{po} = 0,4$  м (кривые 1, 2),  $H_{po} = 0,2$  м (кривые 3, 4),  $H_{po} = 0,05$  м (кривые 5, 6) и при углах резания  $\alpha = 30^\circ$  (кривые 2, 4, 6) и  $\alpha = 60^\circ$  (кривые 1, 3, 5)

При малой высоте ножа ( $H_{po} = 0,05$  м) с увеличением угла его поворота в плане растет удельное сопротивление. По мере увеличения высоты ножа эффективность косого резания повышается.

Так, при  $H_{po} = 0,2$  м и  $\alpha = 30^\circ$  поворот ножа до  $\varphi = 60^\circ$  снижает удельное сопротивление резанию с 12,5 до 6,3 кПа, т. е. примерно в 2 раза. Еще более эффективным является косое резание при  $H_{po} = 0,4$  м. При тех же условиях удельное сопротивление снижается почти в 4 раза – с 24,6 до 6,3 кПа. Дальнейший поворот ножа не является эффективным, что видно из рисунка. Следует отметить, что при  $\alpha = 30^\circ$  начиная с угла поворота  $\varphi \approx 40^\circ$ , а при  $\alpha = 60^\circ$  начиная с угла поворота  $\varphi \approx 60^\circ$  удельное сопротивление резанию не зависит от высоты ножа.

При таких углах поворота в рассматриваемых условиях начинается сход грунта с ножа только через его боковую кромку. Оставшаяся свободной от грунта часть ножа не участвует в процессе резания и не оказывает на него влияния. Поэтому увеличение высоты ножа в этом случае также не влияет на процесс резания, поскольку приводит к увеличению свободной от грунта части ножа. При этом следует обратить внимание на то, что начало схода всего грунта через боковую кромку ножа зависит не только от угла поворота ножа, но и от угла резания. Чем меньше угол резания, тем при меньшем угле поворота ножа начинается такое движение грунта.

Таким образом, теоретически подтверждены экспериментальные исследования и выводы о влиянии высоты рабочего органа на эффективность косого резания грунта [43, 46].

В связи с этим можно предположить, что и ширина рабочего органа будет влиять на косое резание грунта, поскольку сход всей массы грунта с ножа через боковую кромку будет зависеть и от этого параметра.

*Влияние ширины ножа.* Влияние ширины ножа при постоянной высоте рабочего органа  $H_{po} = 0,1$  м исследуется для тех же значений угла резания ( $\alpha = 30^\circ$  и  $\alpha = 60^\circ$ ) (рисунок 3.13). Дополнительно учитываются сопротивления, действующие по торцам ножа. Эти сопротивления по абсолютной величине мало зависят от ширины ножа, но будут сказываться на величине удельного сопротивления резанию тем больше, чем уже нож.

Анализ графиков, приведенных на рисунке, показывает, что поворот в плане относительно широкого ножа ( $B = 0,4$  м) на угол до  $45^\circ$  при  $\alpha = 30^\circ$  почти не влияет на удельное сопротивление резанию. Дальнейший поворот ножа приводит к росту удельного сопротивления.

При  $\alpha = 60^\circ$  увеличение удельного сопротивления резанию начинается раньше, уже при  $\varphi = 30^\circ$ .

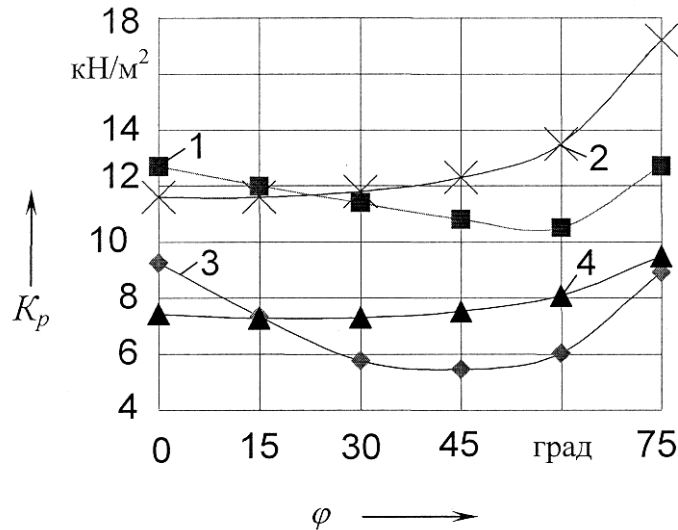


Рисунок 3.13 – Влияние угла поворота ножа в плане  $\varphi$  на удельное сопротивление резанию  $K_p$  при ширине резания  $B = 0,05$  м (кривые 1, 3),  $B = 0,4$  м (кривые 2, 4) и при углах резания  $\alpha = 30^\circ$  (кривые 3, 4) и  $\alpha = 60^\circ$  (кривые 1, 2)

Если ширина ножа мала ( $B = 0,05$  м), то существует ярко выраженная зона, в которой удельное сопротивление резанию будет минимальным. При  $\alpha = 30^\circ$  эта зона находится вблизи угла поворота ножа в плане  $\varphi = 45^\circ$ , а при  $\alpha = 60^\circ$  – угла  $\varphi = 60^\circ$ .

Такой характер влияния ширины рабочего органа на эффективность косого резания нельзя объяснить только изменением веса грунта, перемещаемого по ножу. Следует рассмотреть комплексное влияние всех факторов.

При малой ширине резания сход грунта через боковую кромку начинается при меньшем угле поворота, что в целом благотворно сказывается на процессе резания и улучшает показатели, характеризующие этот процесс.

*Влияние толщины срезаемой стружки.* Рабочий орган с размерами  $B = 0,2$  м;  $H_{po} = 0,2$  м;  $\alpha = 30^\circ$  и  $\alpha = 60^\circ$  исследуется при толщинах срезаемой стружки  $h = 0,02$  м и  $h = 0,1$  м. Из рисунка 3.14 видно, что уменьшение толщины срезаемой стружки повышает эффективность косого резания.

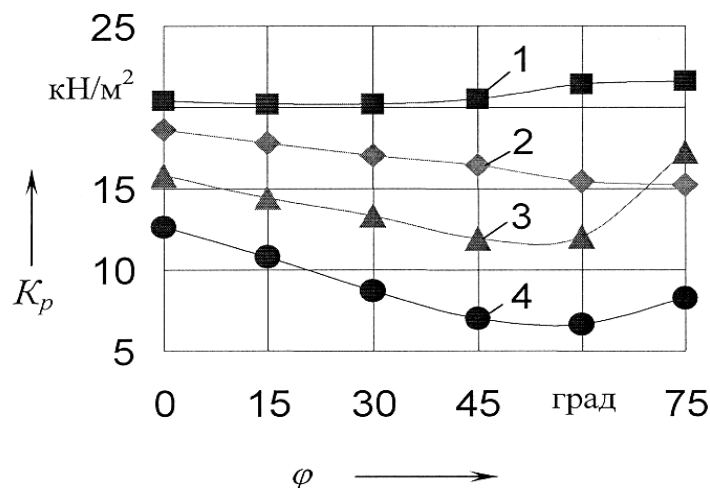


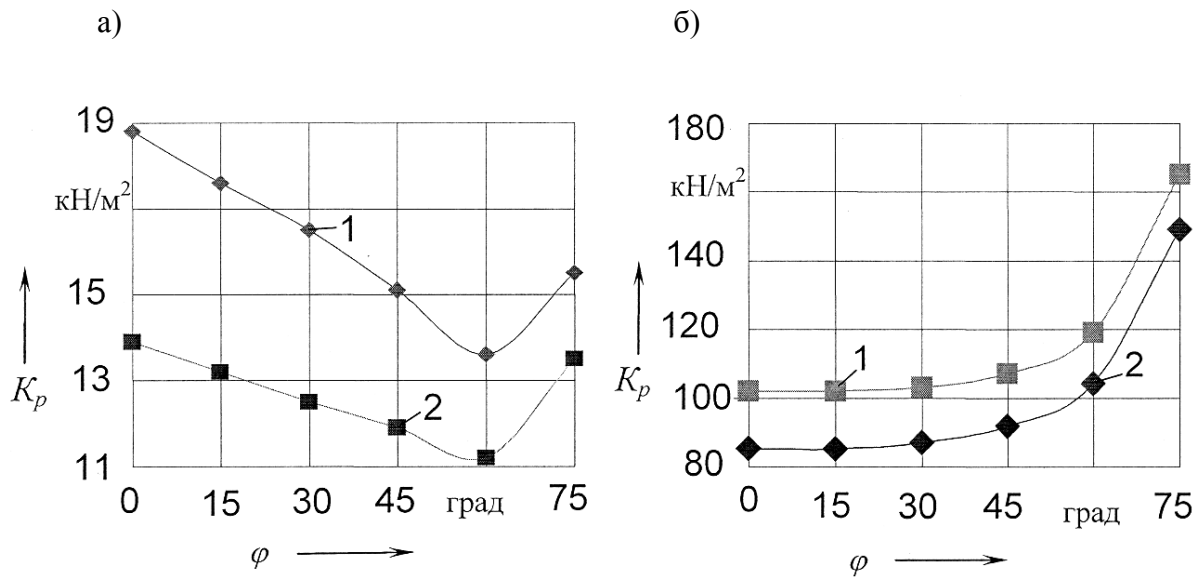
Рисунок 3.14 – Влияние угла поворота ножа в плане  $\varphi$  на удельное сопротивление резанию  $K_p$  при значениях угла резания  $\alpha = 30^\circ$  (кривые 3, 4) и  $\alpha = 60^\circ$  (кривые 1, 2) и при толщине срезаемой стружки  $h = 0,02$  м (кривые 2, 4),  $h = 0,1$  м (кривые 1, 3)

Это происходит под действием многих факторов. При увеличении толщины стружки площадь поверхностей сдвига по торцам ножа, а следовательно, и сила сопротивления сдвигу по ним увеличивается пропорционально квадрату толщины стружки. По этой же причине и вес грунта, срезаемого лидирующей боковой кромкой и перемещаемого по поверхности ножа, также пропорционален квадрату толщины стружки.

При меньшей толщине стружки увеличивается влияние веса грунта, перемещаемого по ножу, по отношению к силам сцепления, действующим на площадке сдвига в момент ее образования. При этом одновременно увеличивается и свободная от грунта поверхность ножа, что также повышает эффективность косого резания при относительно тонких стружках.

*Влияние физико-механических свойств грунта.* Основными расчетными параметрами грунта, от которых зависит сопротивление сдвигу, являются внутреннее трение и сцепление. Исследуется их влияние при резании грунта ножом со следующими геометрическими размерами:  $\alpha = 45^\circ$ ;  $H_{po} = 0,2$  м;  $B = 0,2$  м; толщина срезаемой стружки  $h = 0,05$  м.

Из рисунка 3.15 видно, что даже для одного и того же ножа при установившемся процессе резания эффективность косого резания будет в значительной степени зависеть от физико-механических свойств грунта.



а – при низком ( $c = 5 \text{ кПа}$ ) удельном сцеплении грунта; б – при высоком ( $c = 80 \text{ кПа}$ ); 1 – при угле внутреннего трения  $\rho = 35^\circ$ ; 2 – при  $\rho = 20^\circ$

Рисунок 3.15 – Влияние угла поворота ножа в плане  $\varphi$  на удельное сопротивление резанию  $K_p$

Увеличение внутреннего трения в грунте приводит к росту давления на площадку сдвига из-за роста сил трения, что, в свою очередь, вызывает уменьшение угла сдвига (см. подраздел 2.3). Это увеличивает объем грунта, перемещаемого по ножу. В этом случае сопротивление резанию увеличивается. Поворот ножа в плане незначительно влияет на этот процесс, что подтверждается графиками как при относительно низком (см. рисунок 3.15, а), так и при относительно высоком (см. рисунок 3.15, б) сцеплении грунта.

Иное влияние оказывает удельное сцепление грунта – при относительно большой его величине (см. рисунок 3.15, б) поворот ножа повышает энергоёмкость резания.

Причины такого влияния в следующем (рисунок 3.16). Значение коэффициента  $A$  определялось по формуле

$$A = \frac{K_p^{\max} - K_p^{\min}}{K_p^{\max}} \cdot 100 \%, \quad (3.58)$$



где  $K_p^{\max}$ ,  $K_p^{\min}$  – удельные сопротивления резанию, подсчитанные по максимальному и минимальному значениям касательной составляющей силы сопротивления резанию соответственно.

Коэффициент  $A$  показывает, какая доля от общей величины удельного сопротивления резанию зависит от сил сцепления, действующих в момент сдвига по поверхности площадки сдвига. Из рисунка видно, что при малой величине сцепления грунта доля сил сцепления составляет от 52 до 79,7 % в зависимости от угла поворота ножа и угла внутреннего трения. Остальная доля определяется весом грунта, перемещаемого по ножу. Помимо того, при  $\rho = 35^\circ$  доля сил сцепления меньше, чем при  $\rho = 20^\circ$ .

При  $c = 80$  кПа линии графиков  $\rho = 20^\circ$  и  $\rho = 35^\circ$  почти сливаются в одну. Эти графики показывают, что на долю сил сцепления при лобовом резании приходится свыше 93 % от суммарной величины удельного сопротивления резанию. При косом резании этот показатель продолжает повышаться.

Это свидетельствует о том, что сопротивление резанию грунтов с высоким сцеплением (прочные, мерзлые грунты, угли и т. д.) фактически зависит от одного свойства – сцепления.

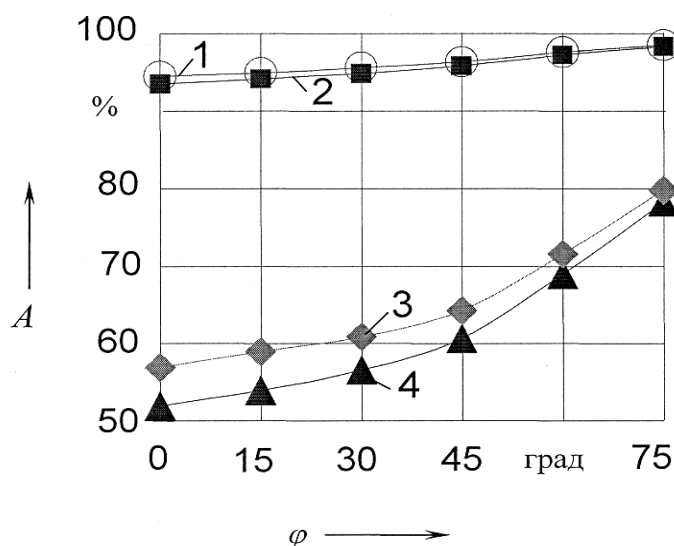


Рисунок 3.16 – Влияние угла поворота ножа в плане  $\varphi$  на коэффициент  $A$  при значениях угла внутреннего трения (1, 3 –  $\rho = 20^\circ$ ; 2, 4 –  $\rho = 35^\circ$ ) при высоком ( $c = 80$  кПа (кривые 1, 2)) и низком ( $c = 5$  кПа (кривые 3, 4)) удельном сцеплении грунта

Экспериментальные исследования подтвердили адекватность разработанного метода физическим процессам не только по силовым параметрам, но и по геометрическим (рисунок 3.17). На фотографии видно и участие лидирующей боковой кромки ножа в резании грунта, и сход грунта с противоположной режущей кромки.

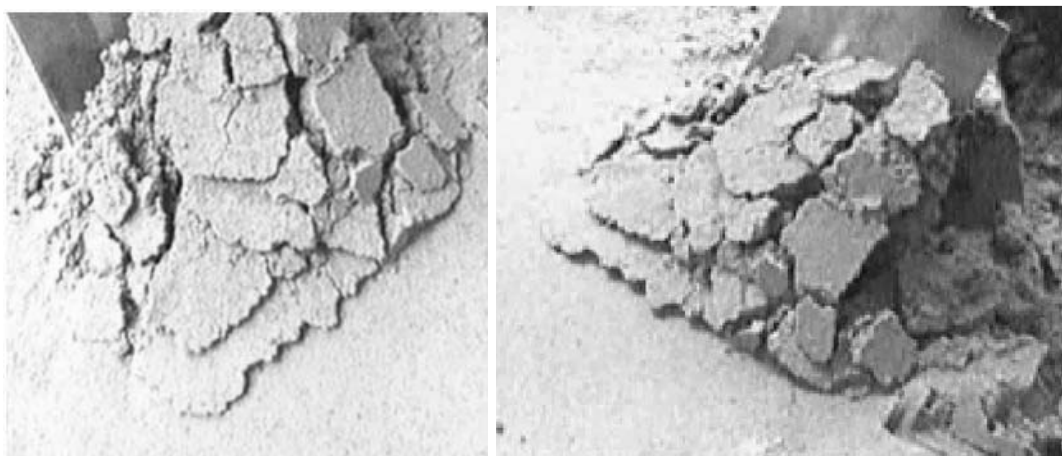


Рисунок 3.17 – Косое резание грунта

### ***Выводы***

Исследования позволили рассмотреть физические процессы, протекающие в грунте при косом резании, и выявить факторы, оказывающие наибольшее влияние на этот вид резания.

С помощью изложенного метода расчета косого резания грунта плоским ножом можно аналитически анализировать эффективность косого резания и оптимизировать параметры ножа.

Для оценки эффективности косого резания необходимо комплексно учитывать в каждом конкретном случае все факторы: геометрические размеры ножа, толщину срезаемой стружки и физико-механические свойства грунта.

## **4 Резание грунта плоским рабочим органом с антифрикционным слоем**

### ***4.1 Общие сведения***

Снижение сопротивления грунта при его разработке землеройными машинами является важной задачей вследствие значительной энергоемкости процесса и больших объемов работ. Одним из направлений снижения энергоемкости может быть уменьшение трения поверхности рабочего органа о грунт. Влияние этого трения на сопротивление грунта аналогично влиянию на него геометрических параметров рабочего органа [50].

Трение между грунтом и рабочим органом можно снизить относительно простыми способами – наплавкой прочных материалов с низким коэффициентом трения, правильной термообработкой трущихся поверхностей [51], а также нанесением на поверхность рабочего органа антифрикционного покрытия.

Для оценки эффективности применяемого способа снижения сил трения необходим метод расчета, позволяющий всесторонне проанализировать данный способ с точки зрения снижения сопротивлений, обеспечивающий выбор рациональных параметров антифрикционной зоны. Последнее особенно важно, если применяются антифрикционные покрытия, т. к. их стоимость может быть высокой.

Резание грунта рабочим органом с антифрикционным покрытием имеет свои особенности, которые следует учитывать. Для снижения стоимости антифрикционное покрытие наносится на отдельный участок поверхности ножа. Рабочая поверхность ножа (или рабочего органа при копании) может иметь несколько слоев такого покрытия по длине ножа, причем каждый слой со своим коэффициентом трения по грунту.

Общая расчетная схема многослойной рабочей поверхности ножа представлена на рисунке 4.1. На схеме изображены три участка ножа с разными коэффициентами трения ( $\omega_1$ ,  $\omega_2$ ,  $\omega_3$ ) и, соответственно, три элемента перемещаемого по ножу грунта, расчет которых ведется по-разному.

Если количество слоев антифрикционного покрытия будет больше трех, то расчет каждого дополнительного элемента грунта, расположен-

ного между верхним и нижним элементом, не будет иметь существенных отличий от расчета элемента  $D_2K_2K_1D_1$  (см. рисунок 4.1).

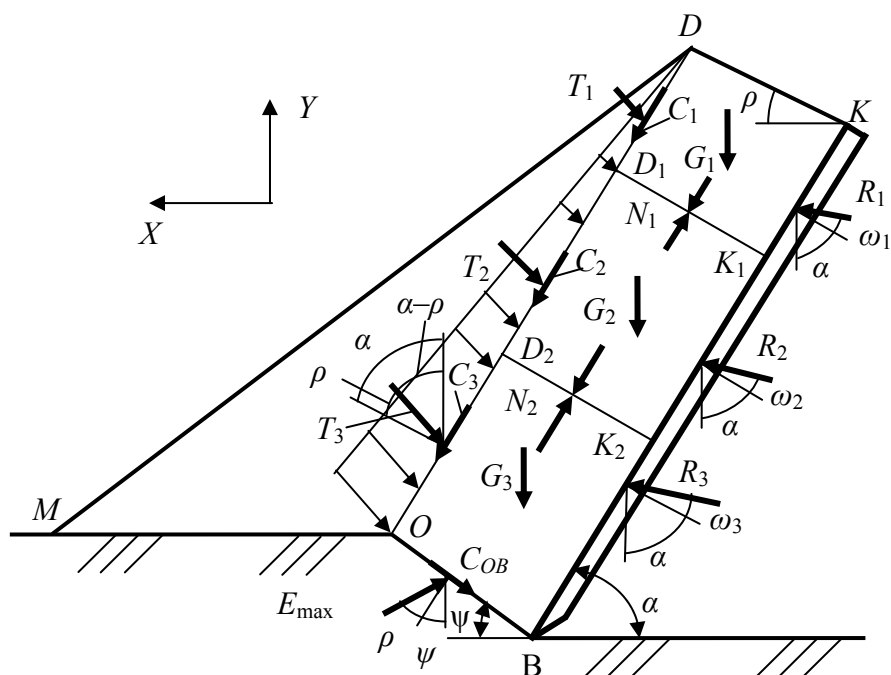


Рисунок 4.1 – Схема для расчета сопротивлений копанью плоским рабочим органом с разным коэффициентом трения на участках его поверхности

#### 4.2 Метод расчета процесса резания грунта ножом с антифрикционным покрытием

*Расчет сопротивлений при наличии призмы волочения.* С помощью расчетной схемы (см. рисунок 2.4) и метода расчета сил, действующих на призму волочения, определяются значения приведенного давления  $p^0$  и угла его отклонения  $\delta^0_1$  в точке  $O$  выхода площадки сдвига на поверхность грунта (см. (2.30)).

Для дальнейших расчетов принимается, что распределение давлений вдоль площадки скольжения  $OD$  является квазистатическим. Такое допущение в механике грунтов считается общепринятым [52, 53]. Оно приводит к треугольной эпюре распределения давлений, возникающих на площадке скольжения  $OD$  от силы  $R_{OD}$  (см. рисунок 2.4).

Тогда давление, действующее в точке  $O$  площадки скольжения  $OD$ , рассчитывается как

$$q_o'' = \frac{2R_{OD}}{l_{OD}B}.$$

Давление  $q''$  определяется в узловых точках  $D_2$  и  $D_1$  (см. рисунок 4.1).

Давление в точке  $D_2$

$$q_{D_2}'' = q_o'' \frac{l_{D_2D_1} + l_{D_1D}}{l_{OD}},$$

где  $l_{D_2D_1}$ ,  $l_{D_1D}$ ,  $l_{OD}$  – длины соответствующих отрезков.

Аналогичным образом рассчитывается давление в точке  $D_1$ :

$$q_{D_1}'' = q_o'' \frac{l_{D_1D}}{l_{OD}}.$$

Тогда значения сил  $T_1$ ,  $T_2$  и  $T_3$ , действующих со стороны призмы волочения на верхний, промежуточный и нижний элементы грунта, движущегося по ножу, определяются соответственно:

$$T_1 = \frac{1}{2} q_{D_1}'' l_{D_1D} B; \quad (4.1)$$

$$T_2 = \frac{1}{2} (q_{D_1}'' + q_{D_2}'') l_{D_2D_1} B; \quad (4.2)$$

$$T_3 = \frac{1}{2} (q_o'' + q_{D_2}'') l_{OD_2} B. \quad (4.3)$$

Далее рассматривается верхний элемент  $D_1K_1KD$  (рисунок 4.2). Сила  $C_1$  от остаточного сцепления, действующего на площадке скольжения  $D_1D$ , рассчитывается по формуле

$$C_1 = c_p l_{D_1D} B. \quad (4.4)$$

Это учтено при составлении уравнений равновесия:

$$\Sigma X = -N_1 \cos \alpha + R_1 \sin(\alpha + \omega_1) - T_1 \sin(\alpha - \rho) + C_1 \cos \alpha = 0;$$

$$\Sigma Y = N_1 \sin \alpha - G_1 + R_1 \cos(\alpha + \omega_1) - T_1 \cos(\alpha - \rho) - C_1 \sin \alpha = 0.$$

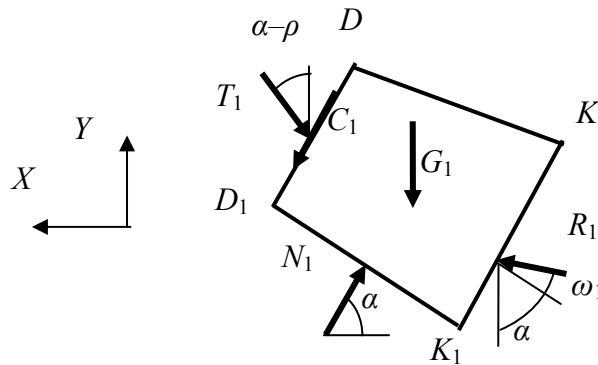


Рисунок 4.2 – Схема для расчета верхнего элемента грунта при наличии призмы волочения

Из этих уравнений

$$R_1 = \frac{N_1 \cos \alpha + T_1 \sin(\alpha - \rho) - C_1 \cos \alpha}{\sin(\alpha + \omega_1)}, \quad (4.5)$$

$$N_1 = \frac{G_1 \sin(\alpha + \omega_1) + T_1 \sin(\omega_1 + \rho)}{\cos \omega_1} + C_1. \quad (4.6)$$

Таким образом, определены все силы, действующие на верхний элемент грунта, перемещаемый по ножу.

Далее рассматривается равновесие промежуточного элемента грунта  $D_2K_2K_1D_1$  (рисунок 4.3).

Уравнения проекций сил на координатные оси  $X$  и  $Y$ :

$$\begin{aligned} \Sigma X = R_2 \sin(\alpha + \omega_2) - N_2 \cos \alpha + N_1 \cos \alpha - \\ - T_2 \sin(\alpha - \rho) + C_2 \cos \alpha = 0; \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \Sigma Y = R_2 \cos(\alpha + \omega_2) - G_2 + N_2 \sin \alpha - N_1 \sin \alpha - \\ - T_2 \cos(\alpha - \rho) - C_2 \sin \alpha = 0. \end{aligned} \quad (4.7)$$

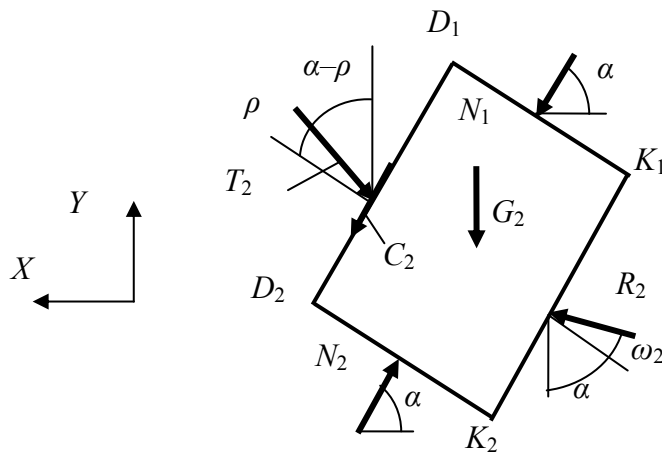


Рисунок 4.3 – Схема для расчета промежуточного элемента грунта при наличии призмы волочения

Сила сцепления  $C_2$  на площадке скольжения  $D_2D_1$  рассчитывается по формуле

$$C_2 = c_p l_{D_2D_1} B.$$

Согласно (4.7)

$$R_2 = \frac{(N_2 - N_1) \cos \alpha + T_2 \sin(\alpha - \rho) - C_2 \cos \alpha}{\sin(\alpha + \omega_2)}; \quad (4.8)$$

$$N_2 = \frac{G_2 \sin(\alpha + \omega_2) + T_2 \sin(\omega_2 + \rho)}{\cos \omega_2} + N_1 + C_2. \quad (4.9)$$

В итоге определены все силы, действующие на промежуточный элемент грунта  $D_2K_2K_1D_1$ , перемещающийся по поверхности ножа на участке, имеющем угол внешнего трения  $\omega_2$ .

Далее рассматривается нижний элемент  $OBK_2D_2$  (рисунок 4.4), для которого уравнения проекций на оси  $X$  и  $Y$  сил получены аналогично:

$$\begin{aligned} \Sigma X = & -E_{\max} \sin(\psi + \rho) - C_{OB} \cos \psi - T_3 \sin(\alpha - \rho) + \\ & + N_2 \cos \alpha + R_3 \sin(\alpha + \omega_3) + C_3 \cos \alpha = 0; \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \Sigma Y = E_{\max} \cos(\psi + \rho) - G_3 - C_{OB} \sin \psi - T_3 \cos(\alpha - \rho) - \\ - N_2 \sin \alpha + R_3 \cos(\alpha + \omega_3) - C_3 \sin \alpha = 0. \end{aligned}$$

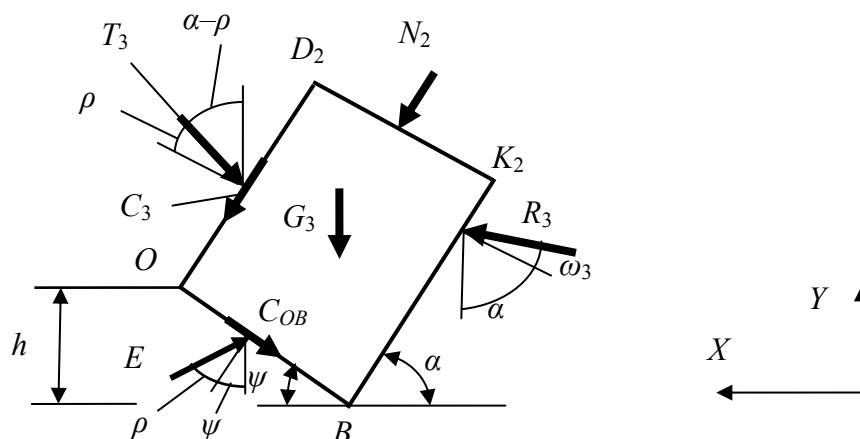


Рисунок 4.4 – Схема для расчета нижнего элемента грунта при наличии призмы волочения

Сила  $C_3$  от остаточного сцепления на площадке скольжения  $OD_2$  определяется по формуле

$$C_3 = c_p l_{OD_2} B. \quad (4.10)$$

Значения сил  $E_{\max}$  и  $R_3$  запишутся в виде

$$E_{\max} = \frac{G_3 \sin(\alpha + \omega_3) - C_{OB} \cos(\alpha + \omega_3 + \psi) + (C_3 + N_2) \cos \omega_3 + T_3 \sin(\omega_3 + \rho)}{\sin(\alpha + \omega_3 + \psi + \rho)}; \quad (4.11)$$

$$R_3 = \frac{E_{\max} \sin(\psi + \rho) + C_{OB} \cos \psi + T_3 \sin(\alpha - \rho) - N_2 \cos \alpha - C_3 \cos \alpha}{\sin(\alpha + \omega_3)}. \quad (4.12)$$

Уравнения (4.11) и (4.12) позволяют определить все силы, действующие на выделенные элементы грунта, перемещающиеся по поверхности ножа по участкам с разным коэффициентом трения. Эти силы определены в функции от угла сдвига  $\psi$ , неизвестного на данном этапе расчета. Для его нахождения используется метод расчета, изложенный в разделе 1 (см. уравнение (1.23) или (1.27) в зависимости от выполнения условия (1.18)), позволяющий определить величину угла сдвига по



граничным условиям на поверхности разрабатываемого грунта в точке  $O$  (см. (2.30)) и на площадке сдвига  $OB$  (см. (2.7)). При использовании (2.7) в него следует подставлять значение силы  $E_{\max}$ , полученное по (4.11).

Алгоритм вычислений будет выглядеть следующим образом:

- выбирается начальное значение угла сдвига  $\psi$  и вычисляются размеры перемещаемого потока грунта;
- вычисляются размеры призмы волочения и определяются силы, действующие с ее стороны на поверхность разрабатываемого грунта и перемещаемый по рабочему органу грунт;
- вычисляются граничные условия на поверхности грунта в точке  $O$ ;
- вычисляются геометрические размеры перемещаемых по ножу элементов грунта отдельно для каждого из участков с разным коэффициентом трения;
- вычисляются силы, действующие со стороны призмы волочения на каждый из выделенных элементов грунта;
- вычисляются силовые параметры для каждого из выделенных элементов грунта, начиная с верхнего, с учетом влияния призмы волочения;
- определяется приведенное давление, действующее на площадку сдвига непосредственно в момент сдвига;
- определяется численное значение выдерживающего это давление угла сдвига;
- сравнивается полученное значение угла сдвига с начальным значением. При их несовпадении корректируется начальное значение угла сдвига соответствующим образом и повторяется процесс вычислений, приведенный выше, до получения результата с требуемой точностью.

Касательная составляющая сопротивления резанию, действующая непосредственно в момент сдвига, в соответствии со схемой на рисунке 4.1 рассчитывается следующим образом:

$$P_1^{\max} = R_1 \sin(\alpha + \omega_1) + R_2 \sin(\alpha + \omega_2) + R_3 \sin(\alpha + \omega_3). \quad (4.13)$$

Аналогично определяется значение нормальной составляющей сопротивления резанию:

$$P_2^{\max} = R_1 \cos(\alpha + \omega_1) + R_2 \cos(\alpha + \omega_2) + R_3 \cos(\alpha + \omega_3). \quad (4.14)$$

Сразу после сдвига сопротивление резанию уменьшится за счет разрушения сцепления по поверхности площадки сдвига.

При  $c = 0$  уравнения (4.11) и (4.12) примут вид:

$$E_{\min} = \frac{G_3 \sin(\alpha + \omega_3) + (C_3 + N_2) \cos \omega_3 + T_3 \sin(\omega_3 + \rho)}{\sin(\alpha + \omega_3 + \psi + \rho)}; \quad (4.15)$$

$$R_3^{\min} = \frac{E_{\min} \sin(\psi + \rho) + T_3 \sin(\alpha - \rho) - N_2 \cos \alpha - C_3 \cos \alpha}{\sin(\alpha + \omega_3)}. \quad (4.16)$$

Значение  $R_3^{\min}$  подставляется в (4.13) и (4.14) вместо силы  $R_3$ , рассчитываются значения касательной и нормальной составляющих сопротивления резанию  $P_1^{\min}$  и  $P_2^{\min}$ , действующих после сдвига грунта по площадке  $OB$ .

Максимально возможная амплитуда колебаний составляющих сопротивления резанию при большом сдвиге:

$$\Delta P_1 = P_1^{\max} - P_1^{\min} = (R_3 - R_3^{\min}) \sin(\alpha + \omega_3); \quad (4.17)$$

$$\Delta P_2 = P_2^{\max} - P_2^{\min} = (R_3 - R_3^{\min}) \cos(\alpha + \omega_3). \quad (4.18)$$

Из полученных уравнений видно, что сцепление грунта, действующее на площадке сдвига  $OB$ , приводит к колебаниям только силы  $R_3$ , действующей на нижний участок ножа.

Сопротивления по боковым граням определяются по методике, изложенной в подразделе 2.1.

*Расчет сопротивлений при отсутствии призмы волочения.* При отсутствии призмы волочения расчетная схема упрощается (рисунок 4.5).

Как видно из расчетной схемы, поверхность  $OD$  свободна от давлений. Поэтому в соответствующих уравнениях силы, действующие со стороны призмы волочения на перемещаемый по ножу поток грунта, следует принимать равными нулю.

Так, уравнения (4.5) и (4.6) для верхнего элемента грунта будут иметь следующий вид:

$$R_1 = N_1 \frac{\cos \alpha}{\sin(\alpha + \omega_1)}, \quad (4.19)$$

$$N_1 = G_1 \frac{\sin(\alpha + \omega_1)}{\cos \omega_1}, \quad (4.20)$$

а (4.8) и (4.9) для промежуточного элемента –

$$R_2 = (N_2 - N_1) \frac{\cos \alpha}{\sin(\alpha + \omega_2)}; \quad (4.21)$$

$$N_2 = G_2 \frac{\sin(\alpha + \omega_2)}{\cos \omega_2} + N_1. \quad (4.22)$$

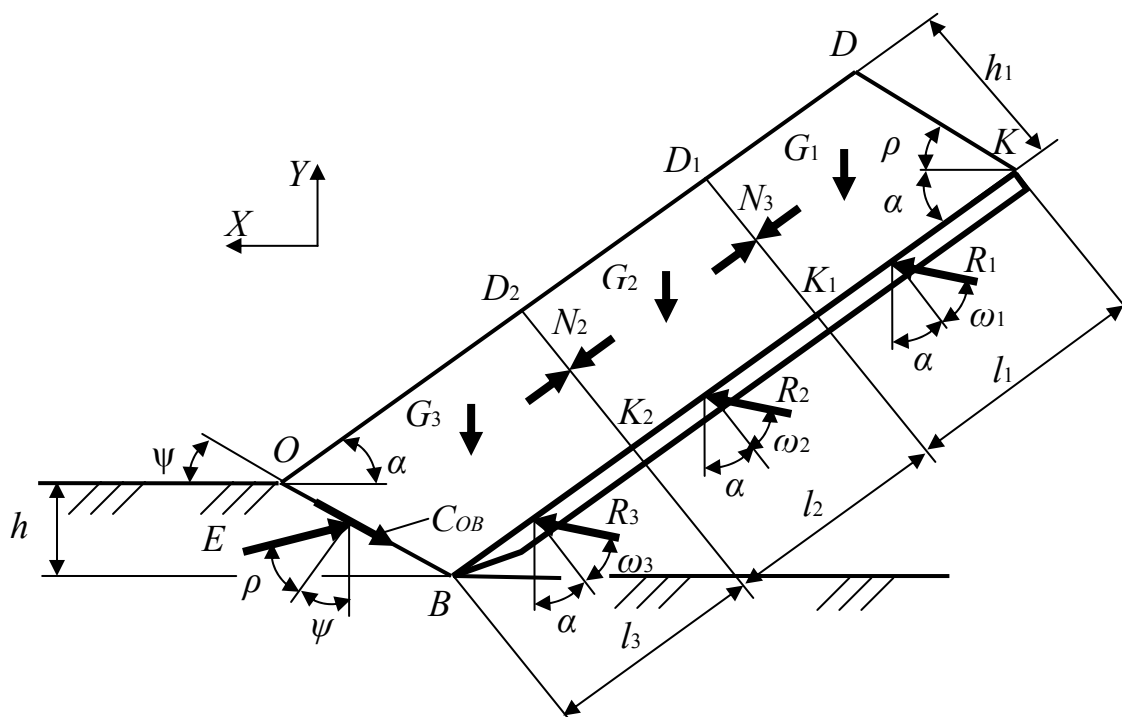


Рисунок 4.5 – Общая расчетная схема при отсутствии призмы волочения

Соответственно изменятся и уравнения для нижнего элемента грунта. Сила  $E_{\max}$  (см. (4.11)) определится по уравнению

$$E_{\max} = \frac{G_3 \sin(\alpha + \omega_3) - C_{OB} \cos(\alpha + \omega_3 + \psi) + N_2 \cos \omega_3}{\sin(\alpha + \omega_3 + \psi + \rho)}, \quad (4.23)$$

а сила  $R_3$  – по

$$R_3 = \frac{E \sin(\psi + \rho) + C_{OB} \cos \psi - N_2 \cos \alpha}{\sin(\alpha + \omega_3)}. \quad (4.24)$$

Для расчета угла сдвига используется метод, изложенный в разделе 1. Но при этом удерживающее давление, действующее на поверхность разрабатываемого грунта, при отсутствии призмы волочения принимается равным давлению связности  $H$ , а угол сдвига определяется в зависимости от выполнения (1.32) по (1.33) либо по (1.35).

В уравнение (2.7), если оно применяется, следует подставлять значение силы  $E_{\max}$ , полученное по (4.24).

Уравнения (4.13)–(4.18) для расчета силовых параметров не изменятся, но при их использовании значения сил  $R_1$ ,  $R_2$  и  $R_3$  необходимо принимать по (4.19), (4.21) и (4.24) соответственно.

*Выбор минимальной длины антифрикционного покрытия.* С помощью приведенного выше метода расчета сопротивлений грунта резанию плоским рабочим органом, поверхность которого имеет слои с разным коэффициентом трения о грунт, рассматривается перемещение по поверхности ножа верхнего и промежуточного элементов грунта. Лишь в уравнениях равновесия нижнего элемента грунта учитываются сопротивления на поверхности формируемой площадки сдвига во второй фазе разрушения грунта – при его «течении».

Из рисунка 1.2, а видно, что условия работы участков ножа  $BN$ ,  $NR$  и  $RK$  различны. Участок  $BN$  внедряется в грунт ненарушенной структуры, участок  $NR$  вместе с площадкой скольжения  $L_3N$  вытесняет призму  $L_3NR$ , а  $RK$  участвует вместе с площадкой скольжения  $O_1R$  в перемещении грунта по поверхности ножа.

При выборе минимальной длины покрытия для перемещения нижнего элемента грунта необходимо учитывать, что она в соответствии с изложенной методикой расчета не должна быть меньше длины отрезка  $BR$ . В этом случае для верхней части ножа  $RK$  используются уравнения для верхнего и нижнего элементов грунта, а для части ножа  $BR$  – уравнения только для нижнего элемента грунта.

Если нижний участок ножа  $BR$  будет иметь слои с разным коэффициентом трения, то нужно прибегать к методам [25], с помощью которых рассчитывается весь цикл разрушения грунта ножом между двумя

соседними большими сдвигами, и определять отдельно длины участков  $BN$  и  $NR$ .

Таким образом, минимальная расчетная длина нижнего участка ножа с антифрикционным покрытием будет равна длине отрезка  $BR$  на рисунке 1.2, а. Согласно специальным методам расчетов [25], минимальная длина покрытия определяется толщиной срезаемой стружки. При  $\alpha = 30^\circ$  она не должна быть меньше 60 % от толщины стружки, а при  $\alpha = 60^\circ$  – 50 % от толщины стружки [54].

Точное определение длины участков с антифрикционным покрытием, которые имеют свои особенности работы при резании и копании грунта, является важным, т. к. позволяет установить минимальную длину участка термообработки или наплавки ножа, минимальную длину антифрикционного покрытия, а значит, снизить нерациональные расходы материалов и энергии при изготовлении ножей.

### ***4.3 Исследование взаимодействия грунта и плоского рабочего органа с антифрикционным слоем***

*Влияние трения грунта по ножу на процесс резания.* Перед исследованием влияния антифрикционных покрытий рассматривается основа – влияние трения грунта по ножу на процесс резания.

Авторами исследовано резание грунта ножом, ширина которого  $B = 0,1$  м, длина  $l_n = 0,1$  м, при двух значениях угла резания ( $\alpha = 30^\circ$  и  $\alpha = 60^\circ$ ), близких к значениям углов резания ножевых и отвальных рабочих органов землеройных машин.

Эксперименты проводились в грунтовом канале лаборатории кафедры СДПТМиО Белорусско-Российского университета. Физико-механические свойства грунта:  $\rho = 28^\circ$  – угол внутреннего трения;  $\rho_s = 1,6$  т/м<sup>3</sup> – плотность;  $c = 4$  кПа – удельное сцепление.

Далее рассматривается резание, для которого задана толщина стружки  $h = 0,02$  м. На рисунке 4.6 представлено графическое определение угла сдвига при разных значениях угла внешнего трения.

Кривая I на рисунке отражает угол сдвига, обеспечивающий устойчивость площадки сдвига при действующем на эту площадку приведенном давлении  $q$ , т. е. имеет вид  $\psi = f(q)$ . Эта кривая построена по формулам (1.33) и (1.35). Остальные кривые, построенные согласно (2.7), при разных значениях угла внешнего трения  $\omega$  показывают изменение

приведенного давления  $q$ , действующего на площадку сдвига, при разных значениях угла сдвига  $\psi$ . Они имеют вид  $q = f(\psi)$ . Точки пересечения этих кривых с кривой I и дадут искомые значения угла сдвига.

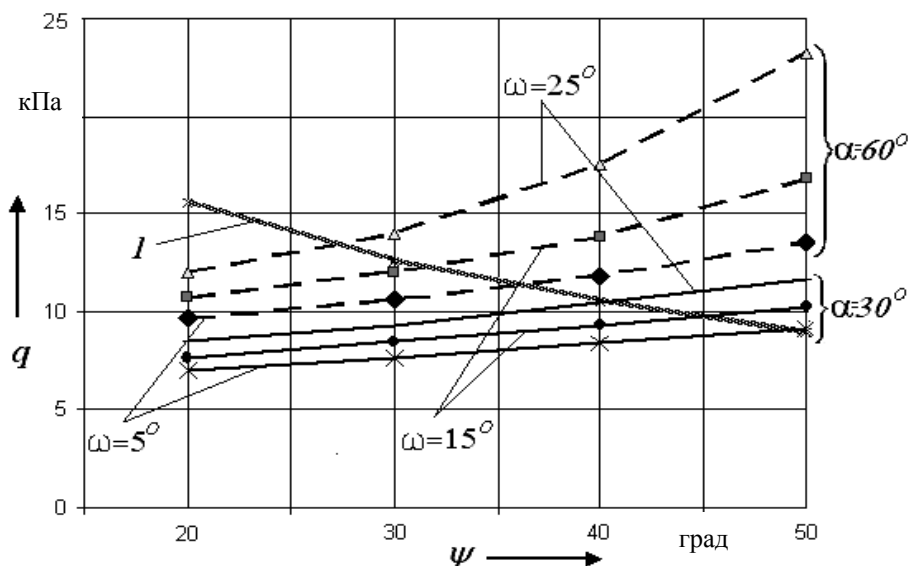


Рисунок 4.6 – Графическое определение угла сдвига при углах резания  $\alpha = 30^\circ$  (сплошные линии) и  $\alpha = 60^\circ$  (штриховые линии) для разных значений угла внешнего трения

Согласно анализу графиков (см. рисунок 4.6), трение грунта по ножу изменяет приведенное давление  $q$ , действующее на площадку сдвига, и, следовательно, угол сдвига  $\psi$ . Это отражено на рисунке 4.7.

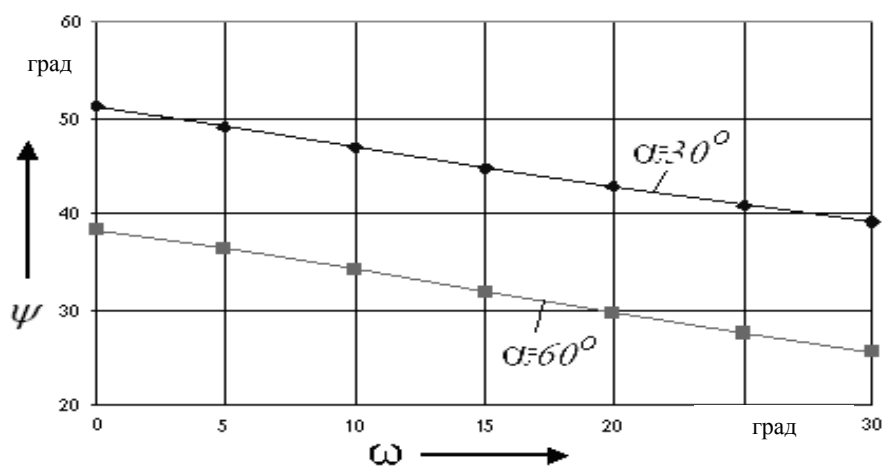


Рисунок 4.7 – Влияние угла внешнего трения на угол сдвига при углах резания  $\alpha = 30^\circ$  и  $\alpha = 60^\circ$

Из рисунка 4.8 видно, что во-первых, изменение угла сдвига влияет на массу перемещаемого по ножу грунта, во-вторых, изменение трения между ножом и грунтом преобразует многоугольники сил в основном за счет положения силы  $R$ , действующей со стороны ножа.

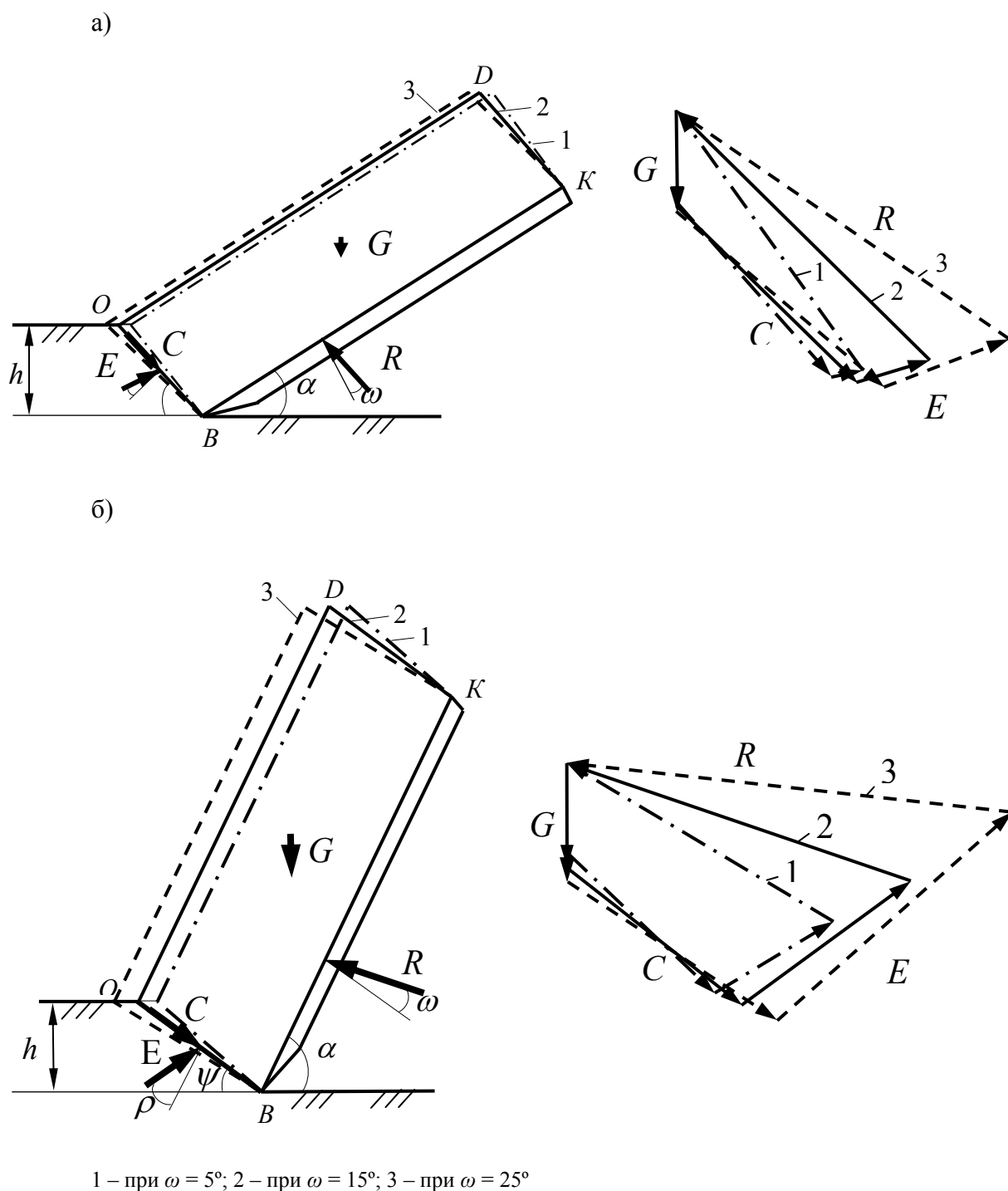


Рисунок 4.8 – Масштабные схемы резания и многоугольники сил при углах резания  $\alpha = 30^\circ$  (а) и  $\alpha = 60^\circ$  (б)

Таким образом, изменение трения между ножом и грунтом влияет на параметры, характеризующие взаимодействие системы «нож–грунт». Это воздействие также существенно, как и влияние геометрических размеров ножа.

Результаты исследований влияния угла внешнего трения на силовые параметры (рисунок 4.9) позволяют оценить влияние внешнего трения как на касательную  $P_1$  и нормальную  $P_2$  составляющие сопротивления копанию, так и на другие силы.

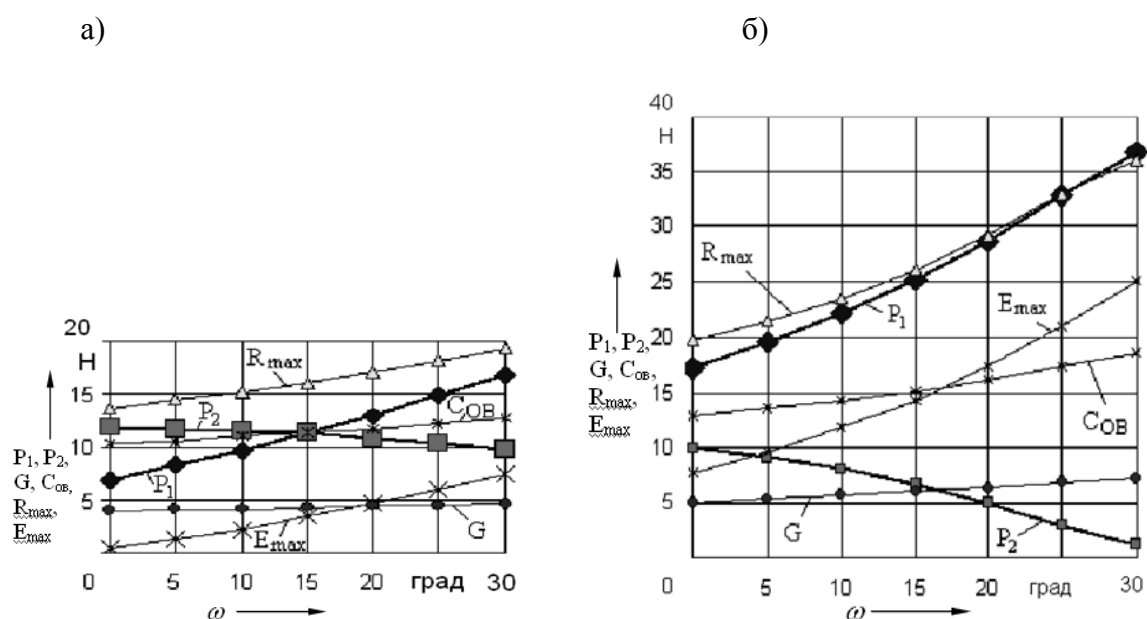


Рисунок 4.9 – Влияние угла внешнего трения на силовые параметры при углах резания  $\alpha = 30^\circ$  (а) и  $\alpha = 60^\circ$  (б)

На основе вышеизложенного можно сделать вывод, что проблема трения весьма серьезна и актуальна и что за счет применения специальных покрытий или иных конструктивных способов снижения трения между грунтом и рабочим органом силу сопротивления резанию можно значительно уменьшить.

*Влияние длины антифрикционного покрытия на процесс резания.* Метод расчета, изложенный в подразделе 4.2, позволяет оценить влияние антифрикционных покрытий на параметры, характеризующие резание грунта. Необходимость проведения исследований обосновывается технологическими и экономическими соображениями, которые сводятся к



проблеме выбора рациональной длины слоя антифрикционного покрытия (из-за его высокой стоимости).

Эксперименты проводились для наиболее характерного грунта на строительных площадках Республики Беларусь – для грунта II–III категории (по числу ударов ударника ДорНИИ), угол внутреннего трения которого  $\rho = 30^\circ$ , удельное сцепление  $c = 40$  кПа, плотность  $\rho_s = 1,6$  т/м<sup>3</sup>. Угол внешнего трения  $\omega$  для ножа без покрытия принимался равным  $28^\circ$ , с покрытием –  $20^\circ$ . Последняя цифра принята из следующих соображений: величина угла трения  $\omega$  может быть достигнута методами термообработки и наплавки и правильным выбором металла без особых трудностей [51].

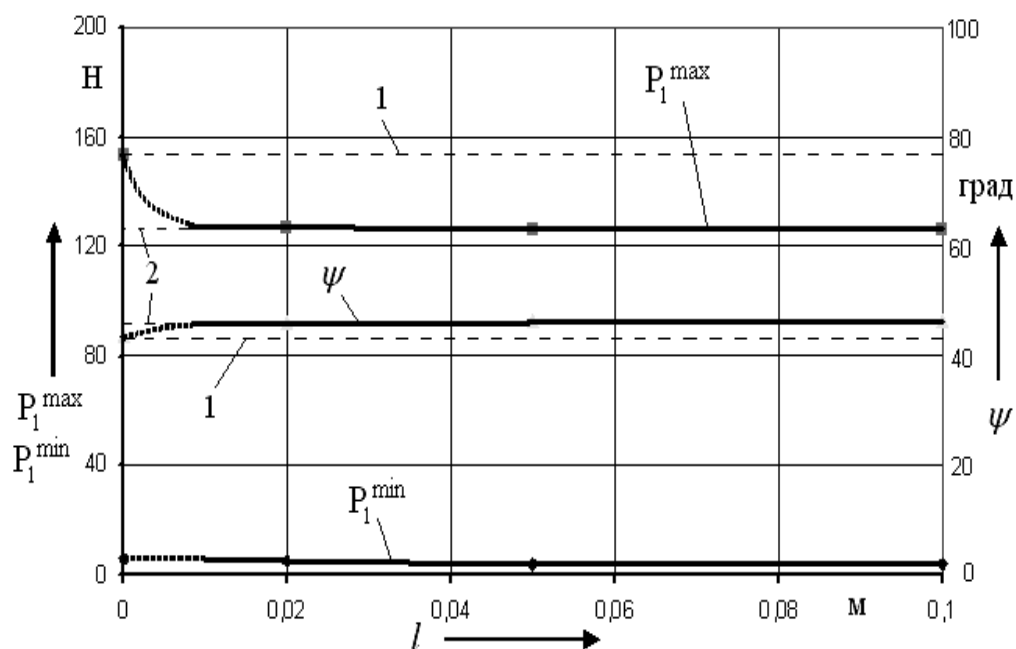
На рисунке 4.10 представлены результаты расчета. Штриховыми линиями обозначены крайние значения исследуемых величин, полученные при углах внешнего трения  $\omega = 28^\circ$  (линия 1) и  $\omega = 20^\circ$  (линия 2), действующих на всей поверхности ножа.

Анализ рисунка 4.10 показывает, что снижение угла внешнего трения с  $28^\circ$  (линия 1) до  $20^\circ$  (линия 2) приводит к увеличению угла сдвига с  $43,5$  до  $48^\circ$  (на 6 %) при угле резания  $\alpha = 30^\circ$  и с  $30,4$  до  $34,1^\circ$  (на 12 %) при угле резания  $\alpha = 60^\circ$ . Максимальное значение силы  $P_1^{\max}$  при угле резания  $\alpha = 30^\circ$  снижается со  $153$  Н (линия 1) до  $126$  Н (линия 2), что составляет 82 % от начального значения, и при угле резания  $\alpha = 60^\circ$  – с  $312$  до  $249$  Н, что составляет, соответственно, 80 %.

Помимо того очевидно, что при резании достаточно прочного грунта ножом с малыми геометрическими размерами вес грунта, перемещаемого по ножу, имеет незначительное влияние. Это подтверждается малыми значениями составляющей сопротивления резанию  $P_1^{\min}$ , действующей после сдвига грунта, когда сцепление на площадке сдвига разрушено, и зависящей от веса перемещаемого грунта. Поэтому и антифрикционное покрытие, нанесенное на верхнюю поверхность ножа, не оказывает существенного влияния.

Наиболее эффективным в рассматриваемых условиях является нанесение покрытия непосредственно у режущей кромки ножа. Так, если оно нанесено на длину  $0,012$  м от режущей кромки, то сила  $P_1^{\max}$  снизится до 83 % при угле резания  $\alpha = 30^\circ$  и до 80 % при угле резания  $\alpha = 60^\circ$ . То есть результаты почти такие же, как и при полном покрытии ножа антифрикционным слоем, но при этом длина антифрикционного слоя уменьшена в 8,3 раза – со значения  $0,1$  м до значения  $0,012$  м при  $\alpha = 30^\circ$  и в 10 раз – до значения  $0,01$  м при  $\alpha = 60^\circ$ .

а)



б)

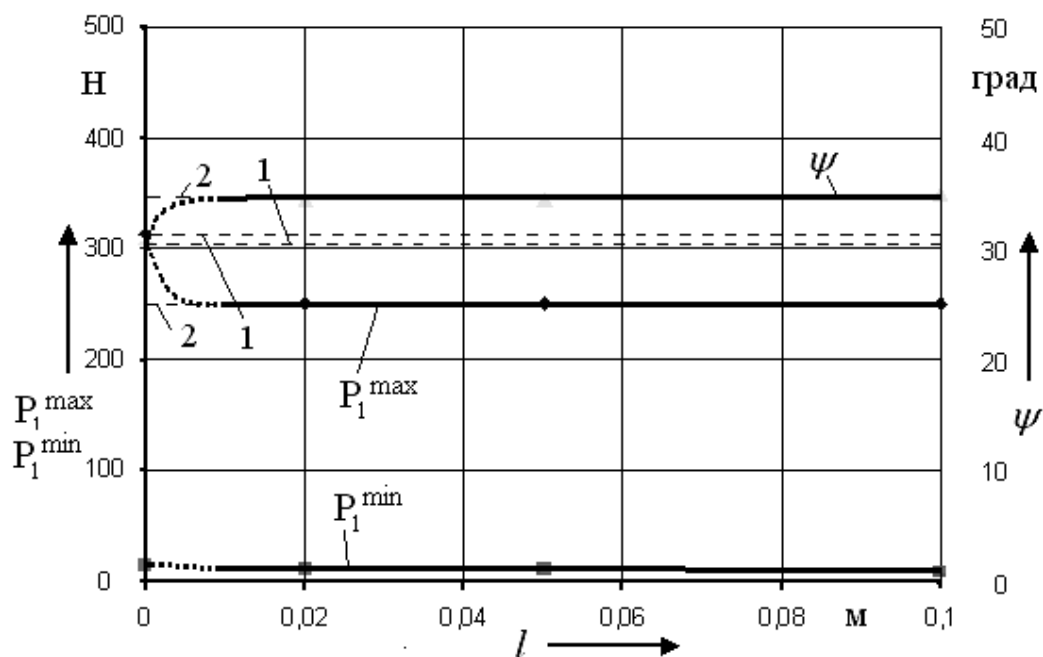


Рисунок 4.10 – Влияние длины  $l$  слоя антифрикционного покрытия на угол сдвига  $\psi$ , максимальное  $P_1^{\max}$  и минимальное  $P_1^{\min}$  значения касательной составляющей сопротивления резанию при  $\alpha = 30^\circ$  (а) и  $\alpha = 60^\circ$  (б)

Следовательно, можно существенно снизить затраты на покрытие или термообработку за счет уменьшения его длины, почти не изменяя положительного эффекта.

*Влияние длины антифрикционного покрытия на процесс копания.* Результаты исследований (рисунок 4.11) получены применительно к ножам шириной  $B = 1$  м, длиной  $l_n = 0,2$  м при  $h = 0,02$  м и  $l_n = 1$  м при  $h = 0,2$  м, установленным под углом резания  $\alpha = 60^\circ$ . Копание плоским рабочим органом длиной  $l_n = 1$  м близко к процессам копания отвалом и ковшем скрепера. Но более простые условия движения грунта по ножу, и, как следствие, более простая расчетная схема позволяют легче его исследовать.

Из рисунка 4.11 видно, что влияние призмы волочения существенно сказывается на процессе копания. Особенно заметно такое влияние при малых толщинах стружки (см. рисунок 4.11, а).

Поток грунта, перемещаемый по ножу (рисунок 4.12), имеет незначительную толщину при  $h = 0,02$  м, поэтому влияние призмы волочения на этот поток весьма существенно по сравнению с таким же влиянием на перемещаемый поток при толщине стружки  $h = 0,2$  м, когда вес перемещаемого потока превышает вес призмы волочения.

Характер влияния антифрикционного покрытия остается неизменным как при наличии, так и при отсутствии призмы волочения. Хотя при этом и заметно, что если при толщине стружки  $h = 0,2$  м нож с антифрикционным слоем минимальной длины увеличивает угол сдвига на 13 % и снижает силу  $P_1^{\max}$  до 82 % по сравнению с ножом без покрытия, то при  $h = 0,02$  м угол сдвига увеличивается на 10 %, а сила  $P_1^{\max}$  составляет 89 % от этой же силы ножа без покрытия.

Приведенные цифры свидетельствуют о большей эффективности антифрикционного покрытия при более толстых стружках, хотя при этом минимальная длина такого покрытия при  $\alpha = 60^\circ$  для рассматриваемых условий увеличится с 0,01 до 0,1 м.

Если вся поверхность рабочего органа имеет антифрикционное покрытие, то при толщине стружки  $h = 0,02$  м угол сдвига увеличится на 14,5 %, а сила  $P_1^{\max}$  снизится только до 84,5 %. При  $h = 0,2$  м угол сдвига не изменится, а сила  $P_1^{\max}$  снизится всего до 80,5 %. Такие цифры будут предельно возможными для данного покрытия. Показательно, что при этом увеличится в 20 раз длина покрытия ножа с  $l_n = 0,2$  м (с минимальной длины 0,01 м до максимальной 0,2 м) и в 10 раз (с минимальной длины 0,1 м до максимальной 1 м) ножа с  $l_n = 1$  м.

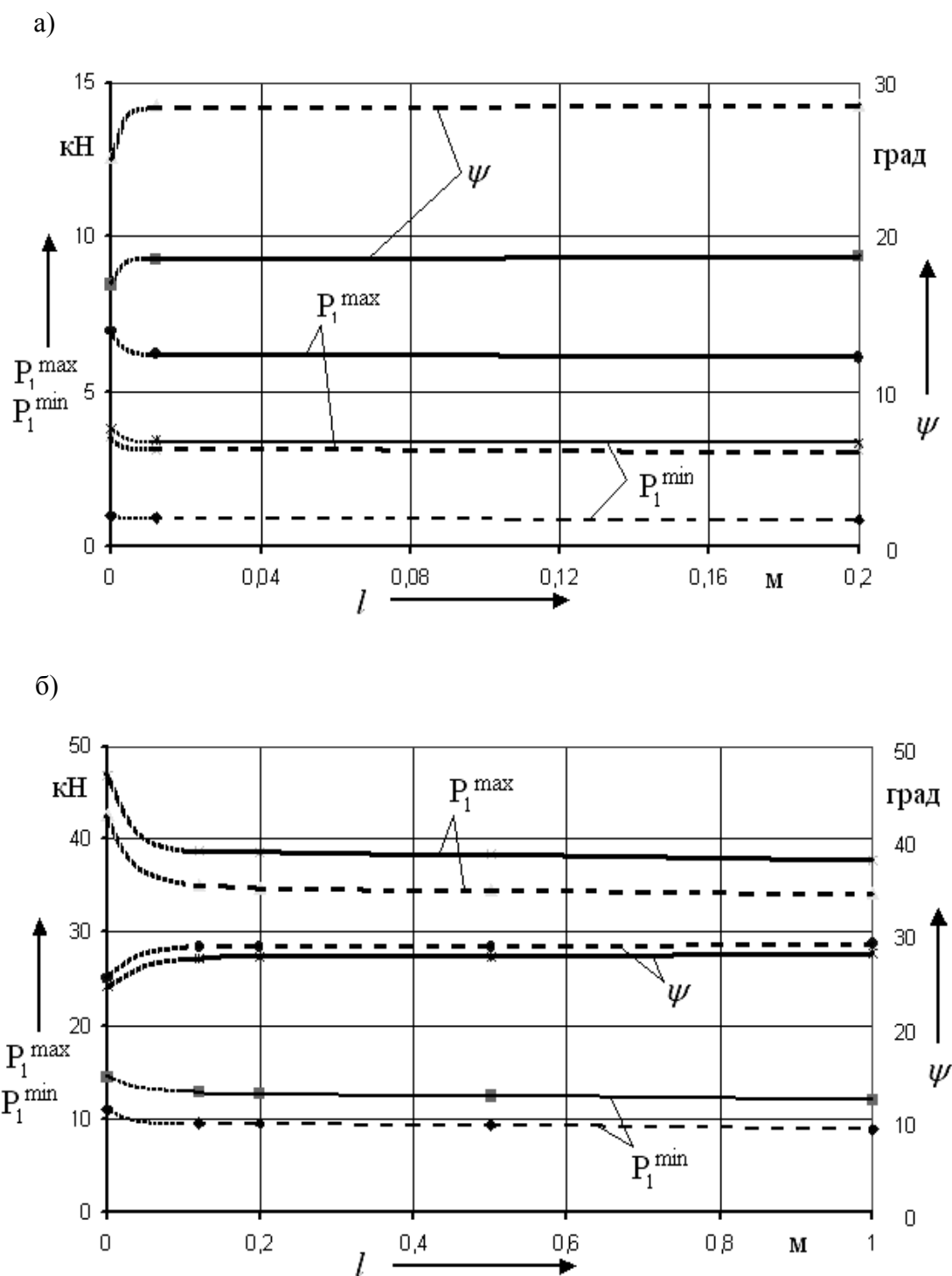


Рисунок 4.11 – Влияние длины  $l$  слоя антифрикционного покрытия на угол сдвига  $\psi$ , максимальное  $P_1^{\max}$  и минимальное  $P_1^{\min}$  значения касательной составляющей сопротивления копанью при толщине стружки  $h = 0,02$  м (а) и  $h = 0,2$  м (б) при угле резания  $\alpha = 60^\circ$  при наличии призмы волочения (сплошные линии) и ее отсутствии (штриховые линии)

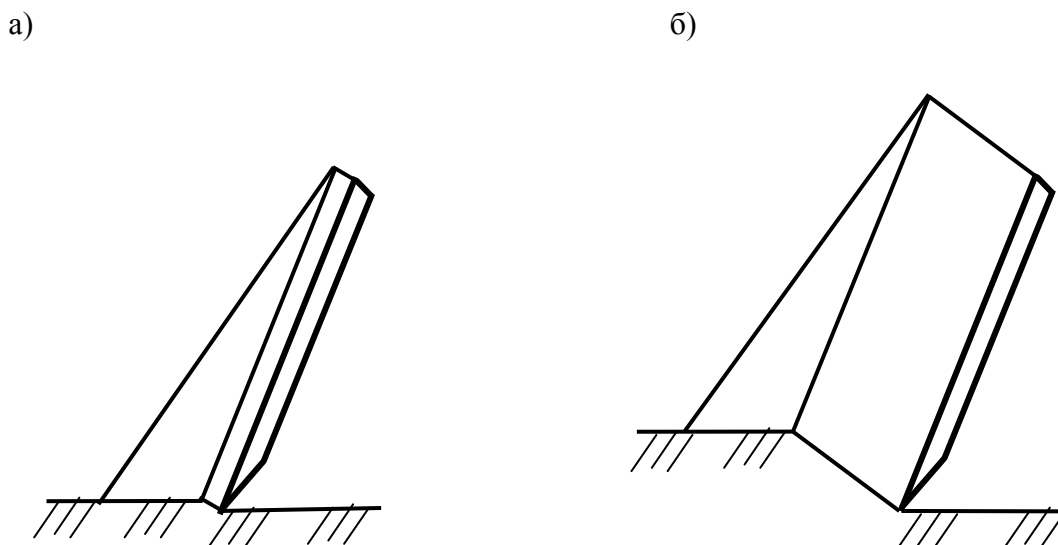


Рисунок 4.12 – Масштабные схемы копания плоским рабочим органом, установленным под углом  $\alpha = 60^\circ$ , при толщине стружки  $h = 0,02$  м (а) и  $h = 0,2$  м (б)

Такое влияние длины антифрикционных покрытий объясняется тем, что наиболее энергоемкой частью при резании и копании грунта является его отделение от массива. Максимальное давление на поверхность ножа действует непосредственно у режущей кромки, и оно в несколько десятков раз превосходит давления на остальной поверхности ножа или рабочего органа, за пределами длины ножа, ограничивающей зону разрушения [54]. Исследования проведены с помощью методов, основанных на расчете амплитудно-частотной характеристики нагруженности рабочего органа, не изложенных в монографии.

Полученные результаты (подраздел 4.3) нельзя автоматически переносить на процесс копания, поскольку при копании отвалом или ковшем сопротивление перемещению срезанного грунта, движущегося по поверхности отвала или сквозь грунт внутри ковша, будет более существенным и в большей степени будет сказываться на результатах расчетов.

### **Выводы**

Изложенная методика расчета отражает физические процессы перемещения элементов грунта по соответствующим участкам поверхности плоского рабочего органа с разными коэффициентами трения, позволяет рассчитать силовые и геометрические параметры этого процесса.

Проведенные исследования влияния трения грунта по ножу и влияния антифрикционных покрытий, снижающих это трение, на процесс резания грунта, позволили выявить особенности изменения сопротивлений при резании грунтов.

Трение грунта о поверхность рабочего органа влияет на процесс резания и параметры, характеризующие этот процесс, аналогично геометрическим размерам рабочего органа. Поэтому на возникающие сопротивления при разработке грунта можно воздействовать, изменяя трение по поверхности рабочего органа.

Наибольший эффект антифрикционное покрытие имеет в том случае, когда оно нанесено на нижнюю часть ножа у режущей кромки. При этом минимальная длина покрытия определяется толщиной срезаемой стружки: при  $\alpha = 30^\circ$  она должна быть не меньше 60 % от толщины стружки, а при  $\alpha = 60^\circ$  – не меньше 50 %.

## 5 Сопротивление заглублению рабочего органа землеройно-транспортных машин

### 5.1 Общие сведения

Рабочий процесс землеройно-транспортных машин сопровождается частыми изменениями положения рабочего органа по высоте. Происходит это по многим причинам, которые можно разделить на две группы:

1) причины, вызванные действиями машиниста, либо направленные на выполнение технологических требований, зависящих от выполняемой работы, либо вытекающие непосредственно из рабочего процесса (заглубление и подъем рабочего органа);

2) причины, вытекающие из особенностей рабочего процесса, зависящие не от действий машиниста, а от макро- и микронеровностей поверхности участка, где работает машина, сказывающихся на заглублении и подъеме рабочего органа при движении по ним машины или даже части его движителя – одного колеса или гусеницы, и многих других факторов.

На заглубление рабочего органа в грунт будут оказывать влияние как геометрические размеры режущей кромки ножей (с учетом площадки, появляющейся из-за износа), так и другие конструктивные параметры машины. К ним можно отнести вертикальную скорость заглубления отвала и согласование ее с поступательной скоростью машины, перераспределение вертикальных сил, приводящее к снижению нагрузки на ходовую часть и, соответственно, к снижению тягового усилия машины.

Наблюдения за машинами в эксплуатирующих организациях показывают, что наиболее интенсивно изнашивается нижняя сторона ножей. Поэтому рассматриваются ножи с типичной площадкой износа, величина которой  $c_{от}$  будет зависеть от времени и интенсивности эксплуатации машины (рисунок 5.1). Расчетная схема площадки износа ножа является общепринятой и используется при расчете вертикальных давлений на режущей кромке отвала бульдозера [55], приведенных в таблице 5.1. Площадка износа принимается расположенной параллельно горизонтальной плоскости. Такое допущение близко к действительности, поскольку, например, для типового бульдозера на базе трактора Т-170 изменение толщины стружки от 0 до 25 см изменяет угол резания, а следовательно, и угловое положение площадки износа всего на 2,5 град.

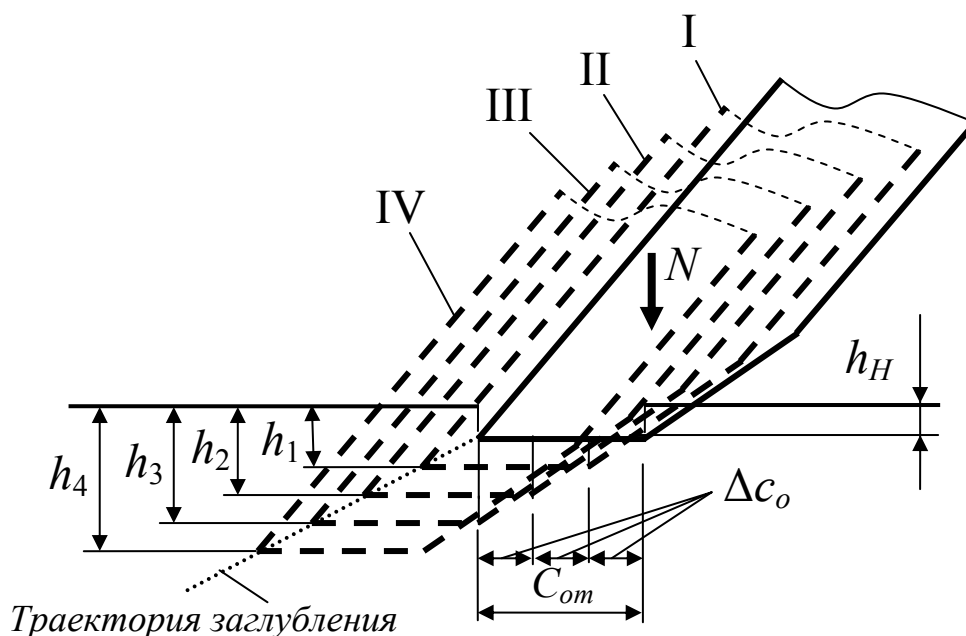


Рисунок 5.1 – Схема заглубления ножа при деформации грунта непердельными давлениями

Таблица 5.1 – Рекомендуемые значения удельных напорных усилий  $q_H$  и вертикальных давлений  $q_B$  на режущей кромке ножей бульдозера

Показатель	Категория грунта			
	I	II	III	IV
	Значение показателей			
$q_H$ , кН/м	До 15	20–30	40–55	Более 60
$q_B$ , мПа	До 1	1,2–2,0	2,5–3,5	Более 3,5

Рассматривая заглубление ножа с площадкой износа, можно выделить основные особенности данного процесса в зависимости от величины давлений, действующих на грунт. Если при заглублении ножа с площадкой износа значения давления на грунт будут меньше предельных, приводящих к разрушению грунта, то в зоне, расположенной под площадкой износа, возникают упругие и пластические деформации, вследствие чего нож заглубляется на некоторую величину, зависящую от геометрических размеров площадки износа, заглубляющего усилия, и физико-механических свойств грунта.



Для расчета данного заглубления можно использовать такие положения механики грунтов, в которых рассматривается поведение грунтов при кратковременном действии динамических нагрузок (механическое уплотнение). В этом случае допускается принимать грунт как линейно-деформируемую и идеально упругую среду [56].

При этих условиях сопротивление  $R$  вертикальным перемещениям характеризуется коэффициентом жесткости основания  $C_h$ :

$$R = C_h F h, \quad (5.1)$$

где  $F$  – площадь основания заглубляемого тела;

$h$  – вертикальное перемещение площади основания.

Коэффициент жесткости  $C_h$  зависит не только от упругих свойств грунта, но и от размеров подошвы основания, что видно из формулы

$$C_h = C_0 \left[ 1 + \frac{2(l+b)}{\Delta_1 F} \right] \sqrt{\frac{p}{p_0}}, \quad (5.2)$$

где  $C_0$  – постоянная упругости основания, не зависящая от размеров подошвы основания;

$l$  и  $b$  – длина и ширина подошвы прямоугольного заглубляемого основания соответственно;

$p$  – давление, передаваемое на грунт основанием;

$p_0$  – давление под опытным штампом, применяемое при определении коэффициента  $C_0$ ;

$\Delta_1$  – постоянный коэффициент размерности,  $\Delta_1 = 1 \text{ м}^{-1}$ .

Численные значения коэффициента  $C_0$ , соответствующие давлению основания на грунт  $p_0 = 0,02 \text{ МПа}$ , приведены в таблице А.1.

Если заглубляемый нож будет при этом перемещаться, то передняя часть площадки износа будет попадать на новый участок грунта, не подвергавшийся ранее вертикальным давлениям (см. рисунок 5.1, положение ножа I). Вследствие этого будет происходить перераспределение давлений, поскольку новый, недеформированный ранее участок грунта будет оказывать меньшее сопротивление по сравнению с предварительно сжатым старым участком. Поэтому давление на оставшуюся часть старого участка будет увеличиваться, что приведет к дополнительному погружению ножа. При перемещении ножа такой процесс

будет повторяться, и нож будет заглубляться по некоторой траектории.

Если же давление на площадке износа достигнет предельных значений, то в зоне под площадкой износа появятся линии скольжения, отделяющие области с предельным напряженным состоянием от массива грунта с ненарушенной структурой.

Величину предельных давлений можно найти, используя положения теории предельного равновесия грунтовых массивов [17]. Она будет зависеть от физико-механических свойств грунта (углов внутреннего и внешнего трения, сцепления) а также от величины и направления давления, действующего на поверхность грунта перед ножом. Поскольку это давление будет зависеть от наличия перед ножом призмы волочения и от ее величины, от того, будет ли эта призма неподвижной или будет двигаться, то возможно существование большого количества расчетных положений.

Необходимо отметить, что фазе заглубления ножа при разрушении грунта предельными давлениями, обеспечивающими быстрое заглубление отвала, предшествует фаза заглубления за счет деформирования грунта непределными давлениями, обеспечивающих заглубление отвала за счет деформаций грунта. Каждая из этих фаз представляет собой практический интерес. Однако определение предельных давлений является ключевой задачей, поскольку предельные давления определяют границу, качественно разделяющую эти фазы.

## ***5.2 Заглубление рабочего органа при непределных давлениях на грунт***

Расчетная схема заглубления ножа под действием силы  $N$  изображена на рисунке 5.1.

Зависимость между нормальным напряжением  $\sigma$  и деформацией грунта  $h$  принята в соответствии с (5.1) прямолинейной:

$$\sigma = K_h h . \quad (5.3)$$

Вместо коэффициента жесткости  $C_h$ , Н/м<sup>3</sup>, чаще используемого при расчете оснований и фундаментов, введен коэффициент  $K_h$ , Па/м, имеющий тот же смысл, но более употребительный при расчете сопротивлений.

Ширина площадки износа  $c_{om}$  делится на отрезки одинаковой длины  $\Delta c_{om}$ . Рассматривается заглабление ножа при его последовательном перемещении на длину, равную длине одного отрезка  $\Delta c_{om}$ , после того, как к нему будет приложено заглабляющее усилие  $N$  постоянной величины и нож заглабится под действием этого усилия на некоторую начальную величину  $h_H$ .

При приложении к ножу заглабляющего усилия  $N$  нормальное давление на грунт  $q'$  будет увеличиваться:

$$q' = \frac{N}{Bc_{om}}, \quad (5.4)$$

где  $B$  – длина отвала.

Под действием этого давления грунт будет деформироваться. При этом давление отпора со стороны грунта будет расти до тех пор, пока нормальные напряжения на его поверхности не сравняются с давлением, рассчитанным по (5.4), т. е. выполнится условие  $\sigma = q$ .

С учетом (5.3) можно определить первоначальную величину заглабления ножа  $h_H$ :

$$h_H = \frac{\sigma}{K_h} = \frac{N}{Bc_{om}K_h}. \quad (5.5)$$

После этого нож перемещается в горизонтальной плоскости. При перемещении ножа на длину одного отрезка  $\Delta c_{om}$  (см. рисунок 5.1, положение ножа I) произойдет изменение давлений по ширине площадки износа. Это вызвано тем, что первый участок  $\Delta c_{om}$  будет находиться на поверхности грунта, ранее не нагруженной, и, следовательно, подпрессовка грунта для этого участка будет равна  $h_1 - h_H$ , а для всех остальных участков останется  $h_1$ . Поэтому и давление на первый участок будет меньшим, что вызовет соответствующее увеличение давления на остальные участки площадки износа, что, в свою очередь, приведет к дальнейшему заглаблению ножа. Можно считать, что

$$N = N_1 + N_{2-3} = \sigma_1 B \Delta c_{om} + \sigma_{2-3} B (c_{om} - \Delta c_{om}), \quad (5.6)$$

где  $N_1$ ,  $N_{2-3}$  – силы, действующие на первый участок и остальную поверхность площадки износа;

$\sigma_1, \sigma_{2-3}$  – давления на соответствующих участках.

Используя (5.3), можно получить для первого перемещения ножа

$$N = K_h(h_1 - h_H)B\Delta c_{om} + K_h h_1 B(c_{om} - \Delta c_{om}). \quad (5.7)$$

Из этой формулы можно определить величину заглубления  $h_1$ , поскольку остальные величины известны.

Аналогично рассматривается положение ножа при втором смещении (см. рисунок 5.1, положение II). В этом случае

$$N = N_1 + N_2 + N_3 = \sigma_1 B\Delta c_{om} + \sigma_2 B\Delta c_{om} + \sigma_3 B\Delta c_{om}. \quad (5.8)$$

С учетом (5.3)

$$N = K_h(h_2 - h_1)B\Delta c_{om} + K_h(h_2 - h_H)B\Delta c_{om} + K_h h_2 B\Delta c_{om}. \quad (5.9)$$

Формула (5.9) содержит все необходимые величины для расчета заглубления ножа  $h_2$ .

При следующих перемещениях ножа формула (5.9) будет выглядеть следующим образом:

– при третьем перемещении

$$N = K_h(h_3 - h_2)B\Delta c_{om} + K_h(h_3 - h_1)B\Delta c_{om} + K_h(h_3 - h_H)B\Delta c_{om}; \quad (5.10)$$

– при четвертом перемещении

$$N = K_h B\Delta c_{om} [(h_4 - h_3) + (h_4 - h_2) + (h_4 - h_1)]. \quad (5.11)$$

Таким образом, если нож, заглубленный в грунт на начальную величину  $h_H$ , постоянным усилием  $N$  перемещать в грунте, то это приведет к его последующему заглублению, т. к. он смещается на новые, не сжимаемые ранее участки грунта. Величину его погружения можно рассчитать по вышеприведенным формулам, рассматривая стадии перемещения, начиная с первой. Зависимость глубины погружения ножа от его перемещения, полученная по полной методике расчета (сплошная линия) имеет вид, представленный на рисунке 5.2.

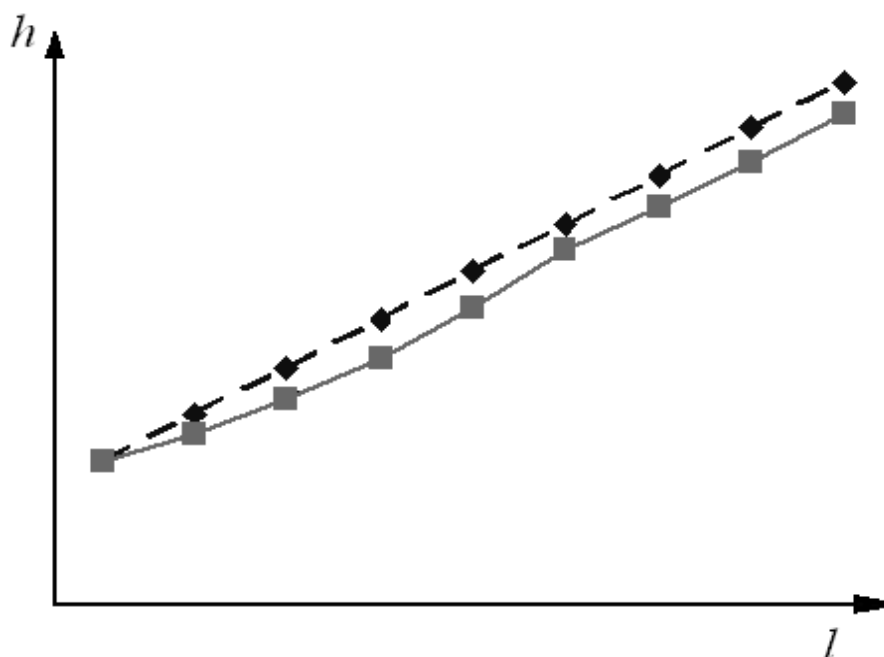


Рисунок 5.2 – Зависимость заглубления ножа  $h$  от его смещения  $l$

Из рисунка видно, что функция  $h = f(l)$ , подсчитанная по предложенной методике, близка к прямолинейной, за исключением начального отрезка. На этом отрезке сказывается влияние начального заглубления ножа  $h_H$ . При следующих смещениях ножа стабилизируются условия заглубления и функцию  $h = f(l)$  можно считать прямолинейной. При этом допустимо, что каждое последующее смещение ножа на величину  $\Delta c_{om}$  приводит к заглублению ножа на величину  $\Delta h$ .

Тогда (5.11) преобразуется следующим образом:

$$\begin{aligned}
 N &= K_h B \Delta c_{om} (\Delta h + 2\Delta h + 3\Delta h) = \\
 &= K_h B \Delta c_{om} \sum_{m=1}^{m=k} m \Delta h = K_h B \Delta c_{om} \Delta h \sum_{m=1}^{m=k} m, \quad (5.12)
 \end{aligned}$$

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

Глубина заглубления ножа при одном его смещении определяется следующим образом:

$$\Delta h = \frac{N}{K_h B \Delta c_{om} \sum_{m=1}^{m=k} m}. \quad (5.13)$$

С повышением количества участков, на которые разбита площадка износа, точность расчетов повышается.

Полное заглубление ножа при  $n$ -м смещении с учетом начального погружения рассчитывается как

$$h = h_H + n\Delta h. \quad (5.14)$$

Если начальное погружение отсутствует, то формула примет следующий вид:

$$h = n\Delta h. \quad (5.15)$$

Результаты расчетов по (5.14) для тех же условий представлены на рисунке 5.2 в виде штриховой линии. Из рисунка видно, что принятое допущение имеет место, поскольку результаты расчетов близки друг к другу, а метод расчета значительно проще.

Формула (5.12) преобразуется:

$$\begin{aligned} N &= B \Delta c_{om} K_h \Delta h + B \Delta c_{om} K_h 2\Delta h + B \Delta c_{om} K_h 3\Delta h = \\ &= B \Delta c_{om} \sigma_1 + B \Delta c_{om} \sigma_2 + B \Delta c_{om} \sigma_3 = N_1 + N_2 + N_3, \end{aligned} \quad (5.16)$$

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

При этом

$$\begin{aligned} \sigma_1 &= K_h \Delta h; \quad \sigma_2 = 2K_h \Delta h; \\ \sigma_3 &= 3K_h \Delta h \quad \text{или} \quad \sigma_m = mK_h \Delta h. \end{aligned} \quad (5.17)$$

Формулы (5.17) показывают, что с увеличением номера участка площадки износа (приближения к задней части ножа) будет расти и давление, действующее на него при заглублении рабочего органа.

Принятая расчетная схема и полученные уравнения позволяют достаточно полно исследовать заглубление рабочего органа в грунт, когда давления на площадке износа не являются предельными и заглубление

происходит за счет деформации грунта, а также увязывать между собой процесс заглубления рабочего органа с его геометрическими и силовыми характеристиками, от которых зависит давление на площадке износа, и с деформационными свойствами разрабатываемого грунта. С помощью изложенной методики расчета можно получить количественную картину распределения давлений по длине площадки износа.

### ***5.3 Заглубление рабочего органа при предельных давлениях на грунт***

Поскольку величина предельных давлений зависит от многих факторов, следует рассматривать следующие основные расчетные положения:

- заглубление рабочего органа при неподвижной машине и при ее движении;
- заглубление рабочего органа при отсутствии и наличии призмы волочения;
- заглубление рабочего органа на начальной стадии, когда поверхность грунта перед отвалом горизонтальна, и при копании, когда существуют наклонные площадки сдвига в грунте перед отвалом.

Далее рассматривается теория предельного равновесия сыпучей среды, обладающей сцеплением [17]. Согласно этой теории, при предельных нагрузках в грунте возникают зоны предельного напряженного состояния, а задача нахождения неизвестных напряжений сводится к определению функциональной зависимости между граничными условиями и свойствами грунта в состоянии предельного равновесия. С учетом того, что площадка износа ножей землеройно-транспортных машин достаточно узкая и, соответственно, объем разрушаемого ею грунта будет невелик, можно использовать частные решения для невесомой среды, имеющие более простой вид.

Для обозначения параметров, характеризующих напряженное состояние грунта (рисунок 5.3), применяются индексы «1» для зоны  $A_0OA_1$  и «2» для зоны  $A_2OA_3$ .

В области  $A_0OA_1$  грунт находится в пассивном предельном напряженном состоянии, а в области  $A_2OA_3$  – в активном. Для этих областей величины  $\sigma_1$ ,  $\varphi_1$  и  $\sigma_2$ ,  $\varphi_2$  постоянны, а сетки линий скольжения образованы двумя семействами параллельных прямых.

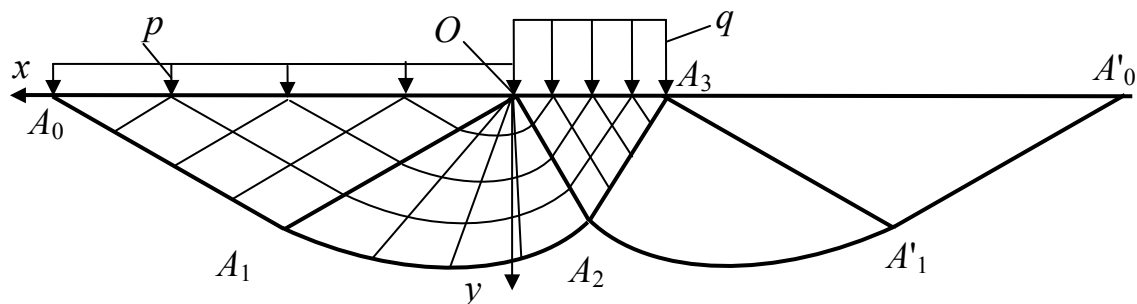


Рисунок 5.3 – Расчетная схема заглубления неподвижного рабочего органа

В специальной зоне  $A_1OA_2$  справедливы интегралы уравнений предельного равновесия (1.13).

Пучок прямых характеристик проходит через точку  $O$ , а кривые характеристики являются логарифмическими спиралями (см. (1.14)), приближающимися к точке  $O$  с увеличением угла  $\theta$ .

Угол  $\theta$  изменяется от значения  $\theta_1 = \varphi_1 + \varepsilon$  на границе  $OA_1$  до значения  $\theta_2 = \varphi_2 + \varepsilon$  на границе  $OA_2$ , а значение  $\varphi$  в зоне  $A_1OA_2$  при этом изменяется от  $\varphi_1$  до  $\varphi_2$ . Тогда левое уравнение (1.13) применительно к правой границе – стороне  $OA_2$ , а следовательно, и ко всей зоне  $A_2OA_3$  можно записать таким образом:

$$\sigma_2 = \sigma_1 \exp(2(\varphi_2 - \varphi_1) \operatorname{tg} \rho). \quad (5.18)$$

Уравнения (1.15), характеризующие напряженное состояние грунта в пассивной зоне  $A_0OA_1$ , примыкающей к удерживающей поверхности, для наиболее сложной расчетной схемы (в случае наклона удерживающей поверхности под углом сдвига  $\psi$ ) будут выглядеть следующим образом:

$$\sigma_1 = p \frac{\sin \Delta_1}{\sin(\Delta_1 - \delta_1)}; \quad \varphi_1 = \frac{1}{2}(\Delta_1 - \delta_1) - \psi. \quad (5.19)$$

Уравнения (1.16) для активной зоны  $A_2OA_3$  при горизонтальной поверхности  $OA_3$  с введением индексов «2»:

$$\sigma_2 = q \frac{\sin \Delta_2}{\sin(\Delta_2 + \delta_2)}; \quad \varphi_2 = \frac{\pi}{2} - \frac{1}{2}(\Delta_2 + \delta_2). \quad (5.20)$$



Но тогда предельное приведенное давление  $q$  определится как

$$q = \sigma_1 \frac{\sin(\Delta_2 + \delta_2)}{\sin \Delta_2} \exp(2(\varphi_2 - \varphi_1) \operatorname{tg} \rho). \quad (5.21)$$

Обобщенное уравнение (5.21) можно использовать в конкретных расчетных случаях, т. к. в нем применяются (5.19) и (5.20), характеризующие напряженное состояние грунта, учитывающие особенности каждого рассматриваемого случая.

*Заглубление неподвижного рабочего органа в грунт.* Рассматривается наиболее простой случай заглубления неподвижного рабочего органа в грунт, поверхность которого горизонтальна (см. рисунок 5.3).

Для зоны  $A_0OA_1$  уравнения (5.19) при горизонтальной удерживающей поверхности и нормальных давлениях, действующих на эту поверхность, запишутся как

$$\sigma_1 = p \frac{1}{1 - \sin \rho}; \quad \varphi_1 = 0. \quad (5.22)$$

Уравнения (5.20) при нормальных давлениях, действующих со стороны неподвижного отвала, также изменятся:

$$\sigma_2 = q \frac{1}{1 + \sin \rho}; \quad \varphi_2 = \frac{\pi}{2}.$$

Тогда (5.21) при нормальном давлении  $q$  и известных значениях параметров  $\sigma$  и  $\varphi$  для рассматриваемых зон позволяет получить

$$q = p \frac{1 + \sin \rho}{1 - \sin \rho} \exp(\pi \operatorname{tg} \rho). \quad (5.23)$$

В этих уравнениях учтено, что для нормальных давлений выражения  $\frac{\sin \Delta_1}{\sin(\Delta_1 - \delta_1)}$  и  $\frac{\sin \Delta_2}{\sin(\Delta_2 + \delta_2)}$  заменяются их пределами, которые при  $\delta_1 \rightarrow 0$  и  $\delta_2 \rightarrow 0$  будут иметь вид  $\frac{1}{1 - \sin \rho}$  и  $\frac{1}{1 + \sin \rho}$ .

Из рисунка 5.3 видно, что схема разрушения грунта при нормальных давлениях будет симметрична в обе стороны. Различными могут быть давления  $p$  на удерживающую поверхность. При отсутствии призмы волочения оно будет равно давлению связности  $H$  перед отвалом и позади него. При наличии призмы волочения на поверхность грунта перед отвалом дополнительно будет действовать давление от призмы волочения, препятствующее выпору грунта в эту сторону.

Это давление равно геометрической сумме действительного давления от призмы волочения  $p'$ , действующего на поверхность грунта, и давления связности:

$$p = p' + H = \rho_z g H_{np} + c \operatorname{ctg} \rho. \quad (5.24)$$

Следовательно, грунт будет разрушаться в сторону области, расположенной за рабочим органом. Таким образом, предельные давления, приводящие к разрушению грунта в момент заглубления неподвижного рабочего органа при горизонтальной удерживающей поверхности будут определяться по (5.23) при  $p = H$ .

Поскольку полученное значение давления  $q$  является приведенным, то действительное разрушающее давление в рассматриваемом случае

$$q' = q - H. \quad (5.25)$$

*Заглубление движущего рабочего органа на начальной стадии.* При заглублении движущего рабочего органа, имеющего подвижную призму волочения, при горизонтальной удерживающей поверхности грунта (рисунок 5.4) первое уравнение (5.19) для пассивной зоны  $A_0OA_1$  останется таким же, а второе незначительно изменится, т. к.  $\psi = 0$ .

$$\sigma_1 = p \frac{\sin \Delta_1}{\sin(\Delta_1 - \delta_1)}; \quad \varphi_1 = \frac{1}{2}(\Delta_1 - \delta_1). \quad (5.26)$$

В активной области  $A_2OA_3$  используются уравнения (5.20). Тогда из (5.21)

$$q = p \frac{\sin \Delta_1}{\sin(\Delta_1 - \delta_1)} \cdot \frac{\sin(\Delta_2 + \delta_2)}{\sin \Delta_2} \exp[(\pi - \Delta_2 - \delta_2 - \Delta_1 + \delta_1) \operatorname{tg} \rho]. \quad (5.27)$$

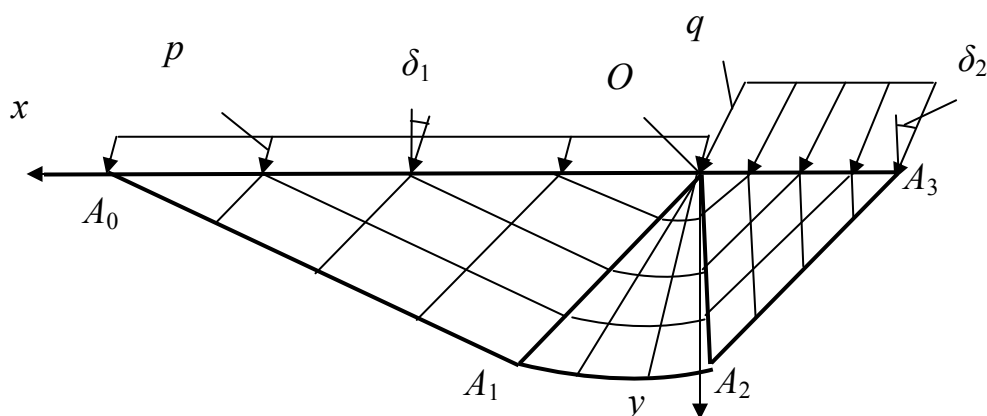


Рисунок 5.4 – Расчетная схема заглабления подвижного рабочего органа при подвижной призме волочения

Приведенное давление  $p$  является геометрической суммой действительного давления  $p'$  от призмы волочения и давления связности  $H$  и в соответствии со схемой на рисунке 5.5, а при движущейся призме волочения рассчитывается как

$$p = \sqrt{(H + p'_\sigma)^2 + p'_\tau{}^2} = \sqrt{(c \operatorname{ctg} \rho + p'_\sigma)^2 + (p'_\sigma \operatorname{tg} \rho)^2}, \quad (5.28)$$

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

Угол отклонения  $\delta_1$  приведенного давления  $p$  определится как

$$\delta_1 = \operatorname{arctg} \frac{p'_\sigma \operatorname{tg} \rho}{c \operatorname{ctg} \rho + p'_\sigma}. \quad (5.29)$$

При использовании (5.27) необходимо учесть, что угол отклонения  $\delta_2$  приведенного давления  $q$ , действующего со стороны площадки износа ножа на грунт, будет зависеть от действительного давления  $q'$ . В соответствии со схемой на рисунке 5.5, б приведенное давление  $q$  и угол его отклонения  $\delta_2$  рассчитываются следующим образом:

$$q = \sqrt{(q' \cos \omega + H)^2 + (q' \sin \omega)^2} ;$$

$$\delta_2 = \arctg \frac{q' \sin \omega}{q' \cos \omega + H} . \quad (5.30)$$

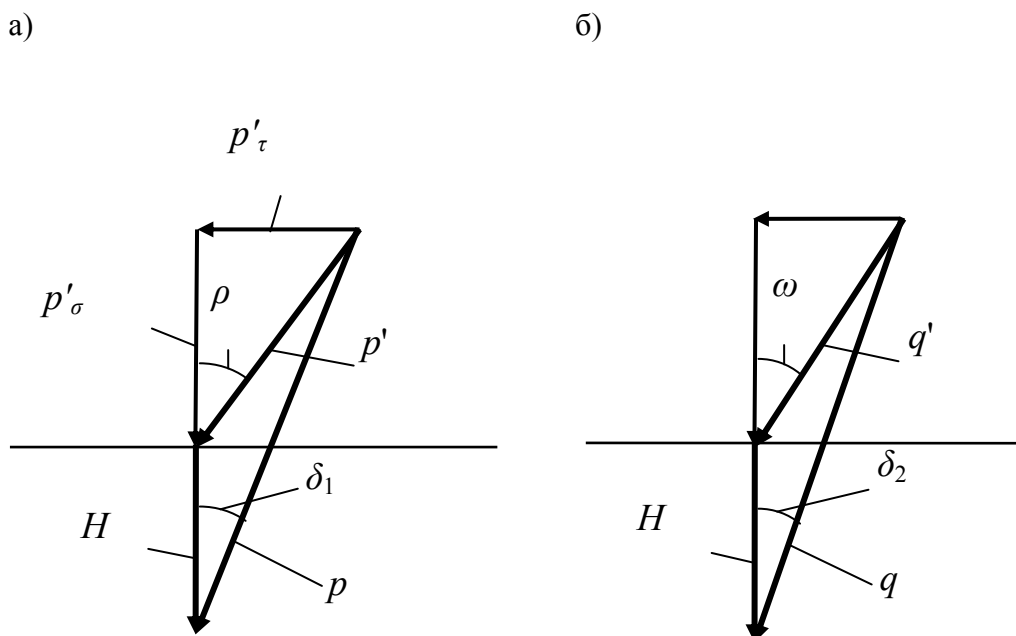


Рисунок 5.5 – Схемы для расчета давлений на поверхность грунта при движущейся призме волочения (а) и движущемся ноже (б)

Поэтому разрушающее давление  $q$  определяется с помощью итерационных методов. Задается некоторая начальная величина действительного давления  $q'$ . Угол отклонения этого давления при движении ножа по грунту будет равен углу внутреннего трения  $\omega$ .

Начальное приведенное давление  $q_n$  и угол его отклонения  $\delta_2^H$  рассчитываются по (5.30). После этого по (5.27) вычисляется предельное давление  $q$ , приводящее к разрушению грунта при том же угле отклонения  $\delta_2^H$ .

Если полученное по (5.27) значение давления  $q$  отличается от начального, необходимо изменять начальное значение действительного давления  $q'_n$  и повторять вычисления до выполнения условия

$$q_n - q \leq \Delta , \quad (5.31)$$

где  $\Delta$  – принятая погрешность вычислений.

Переход к действительному давлению  $q'$  осуществляется в соответствии с рисунком 5.5, б:

$$q' = \sqrt{(q \cos \delta_2 - H)^2 + (q \sin \delta_2)^2}. \quad (5.32)$$

Прежде чем рассмотреть заглублиение движущего рабочего органа при неподвижной призме волочения, следует изучить схему на рисунке 5.6. Из рисунка видно, что если траектория 1 режущей кромки рабочего органа при заглублиении будет расположена в зоне I (левее предельной траектории 3), то движущийся при заглублиении рабочий орган будет перемещать призму волочения.



Рисунок 5.6 – Схема к расчету скоростей при заглублиении рабочего органа

И наоборот, если траектория 2 режущей кромки при заглублиении будет расположена в зоне II (правее предельной траектории 3), то при заглублиении поверхность движущегося рабочего органа, отходя от грунта, не будет перемещать призму волочения.

Критической траекторией, разделяющей эти две области, является траектория 3, совпадающая с нижним прямолинейным участком рабочего

органа, на котором крепятся ножи. Ее угловое положение в пространстве (угол  $\alpha_3$ ) определяется как

$$\alpha_3 = \arctg \frac{v_{om}}{v_6} = \alpha_{om}, \quad (5.33)$$

где  $\alpha_{om}$  – угол резания;

$v_{om}$  – вертикальная скорость заглубления рабочего органа;

$v_6$  – скорость перемещения машины.

Таким образом, при относительно медленном заглублении рабочего органа (угол заглубления меньше угла резания) призма волочения будет перемещаться, а при относительно быстром (угол заглубления больше угла резания) не будет. Первый случай (медленное заглубление) рассмотрен выше, а для расчета второго (быстрое заглубление) используется схема на рисунке 5.7.

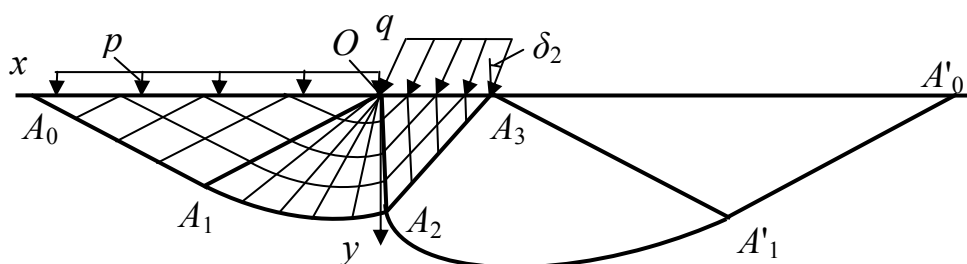


Рисунок 5.7 – Схема заглубления подвижного рабочего органа при неподвижной призме волочения

Для зоны  $A_0OA_1$  применяются уравнения (5.22), а для зоны  $A_2OA_3$  – уравнения (5.20). Уравнение (5.21) можно записать для этого случая следующим образом:

$$q = p \frac{\sin(\Delta_2 + \delta_2)}{(1 - \sin \rho) \sin \Delta_2} \exp[(\pi - \Delta_2 - \delta_2) \operatorname{tg} \rho]. \quad (5.34)$$

При этом нормальное давление  $p$  определяется по (5.24).

Однако, кроме этого, необходимо рассмотреть и *альтернативную возможность разрушения грунта* – в сторону задней части ножа. Выпор грунта при заглублении рабочего органа будет происходить в ту сторону, куда потребуется меньшее разрушающее давление. И если при неподвижном рабочем органе при наличии призмы волочения разрушение грунта произойдет только в сторону задней части рабочего органа, а при отсутствии призмы волочения – в обе стороны, то при движущемся рабочем органе однозначно ответить на этот вопрос невозможно.

Рассмотрен такой случай, когда грунт будет разрушаться в области  $OA_2A'_1A'_0$  (см. рисунок 5.7). В зоне  $A_3A'_1A'_0$  напряженное состояние грунта описывается уравнениями (5.22) при  $p = H$ . Для зоны  $A_2OA_3$  используется первое из уравнений (5.20). Значение  $\varphi_2$  изменится на  $\pi$  в связи с изменением системы координат и принятого отсчета углов на противоположные и станет равным  $\varphi'_2$ . При этом

$$\varphi'_2 = \pi - \varphi_2 = \frac{\pi}{2} + \frac{1}{2}(\Delta_2 + \delta_2).$$

Тогда

$$q = H \frac{\sin(\Delta_2 + \delta_2)}{(1 - \sin \rho) \sin \Delta_2} \exp[(\pi + \Delta_2 + \delta_2) \operatorname{tg} \rho]. \quad (5.35)$$

Таким образом, при движущемся рабочем органе необходимо рассматривать альтернативный вариант разрушения грунта и выбирать такой случай, при котором приведенное давление  $q$  будет минимальным.

К расчетной схеме (см. рисунок 5.7) относится и случай, когда движущийся рабочий орган заглубляется *без призмы волочения*. В этом случае  $p = H$ , и формула (5.34) запишется следующим образом:

$$q = H \frac{\sin(\Delta_2 + \delta_2)}{(1 - \sin \rho) \sin \Delta_2} \exp[(\pi - \Delta_2 - \delta_2) \operatorname{tg} \rho]. \quad (5.36)$$

Это давление меньше, чем в случае выпора грунта в сторону задней части рабочего органа (см. (5.35)), поэтому альтернативный случай при отсутствии призмы волочения нет необходимости рассматривать.

*Заглубление рабочего органа при копании.* Рассмотрено заглубление рабочего органа при копании (толщиной стружки  $h$ ), когда перед ножом

будет находиться площадка сдвига, наклоненная к оси  $x$  под углом  $\psi$ . При неподвижной машине устойчивость грунта против выпора в сторону задней части ножа будет ниже, чем в направлении площадки сдвига, поэтому можно использовать (5.23) при  $p = H$ .

Если движущийся рабочий орган заглубляется при высокой скорости под углом, большим, чем критический угол, определяемый по (5.33), то грунт перед ним неподвижен. Далее следует рассмотреть треугольник  $OBD$  на схеме (рисунок 5.8).

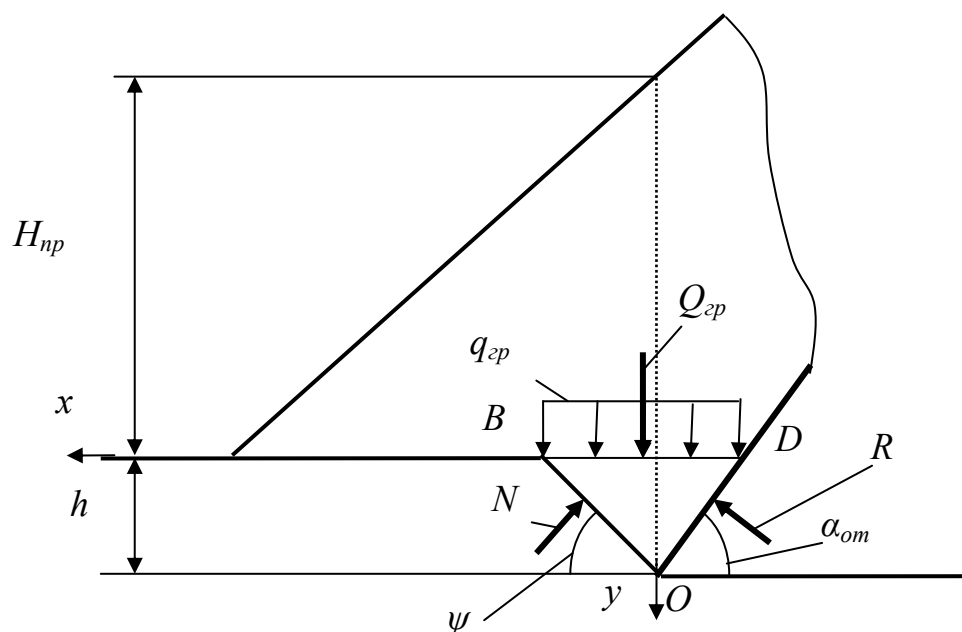


Рисунок 5.8 – Схема к расчету силовых параметров при высокой скорости заглубления рабочего органа при копании

Силу  $Q_{cp}$ , действующую на поверхность  $BD$  со стороны вышележащего грунта, можно найти по формуле

$$Q_{cp} = \rho g H_{np} B l_{BD},$$

где  $B$  – длина отвала;

$l_{BD}$  – длина поверхности  $BD$ ,

$$l_{BD} = h \left( \frac{1}{\operatorname{tg} \psi} + \frac{1}{\operatorname{tg} \alpha_{om}} \right).$$



Весом призмы  $OBD$  можно пренебречь ввиду его незначительности. Тогда уравнения проекций всех сил, действующих на условно неподвижную выделенную призму  $OBD$ , на координатные оси  $x$  и  $y$ :

$$\Sigma x = N \sin \psi - R \sin \alpha_{om} = 0;$$

$$\Sigma y = Q_{cp} - N \cos \psi - R \cos \alpha_{om} = 0.$$

Из этих уравнений

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

Действительное давление  $p'$  от силы  $N$  рассчитывается как

$$p' = \frac{N \sin \psi}{h}.$$

Для определения приведенного нормального давления  $p$  используется формула  $p = p' + H$ .

Схема разрушения грунта для этого расчетного случая представлена на рисунке 5.9.

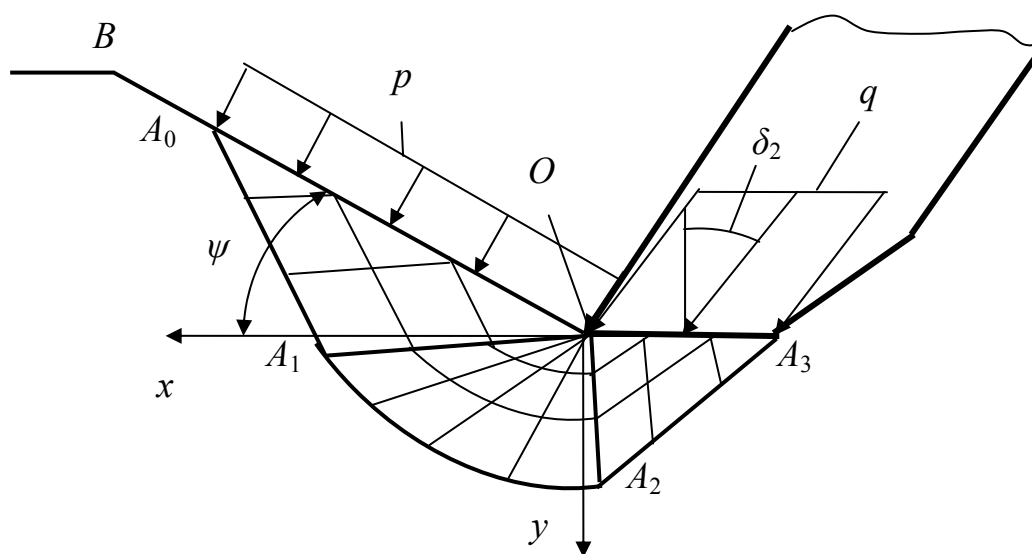


Рисунок 5.9 – Расчетная схема разрушения грунта при заглублении рабочего органа при копании с высокой скоростью заглубления

Для зоны  $A_0OA_1$ , находящейся под действием нормальных давлений, уравнения (5.19) примут вид:

$$\sigma_1 = p \frac{1}{1 - \sin \rho}; \quad \varphi_1 = -\psi.$$

Для области  $A_2OA_3$  применяются уравнения (5.20). Тогда

$$q = p \frac{\sin(\Delta_2 + \delta_2)}{(1 - \sin \rho) \sin \Delta_2} \exp[(\pi - \Delta_2 - \delta_2 + 2\psi) \operatorname{tg} \rho]. \quad (5.37)$$

При заглублении отвала по траектории, приводящей к движению срезанного грунта по площадке сдвига (рисунок 5.10), для определения приведенных давлений  $p$ , действующих на площадку сдвига, и угла сдвига  $\psi$  используется метод расчета, изложенный в разделе 2.

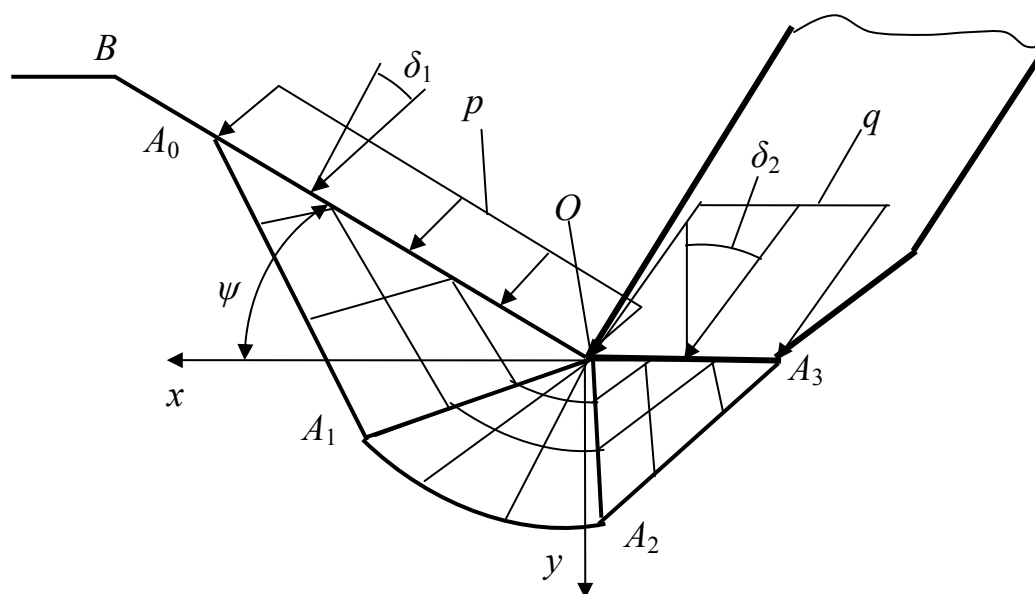


Рисунок 5.10 – Расчетная схема разрушения грунта при заглублении рабочего органа и перемещении срезанного грунта отвалом

Изменение условий нагружения площадки сдвига при разрушении грунта делают обязательным рассмотрение двух случаев – в момент ее

формирования, когда приведенное давление, действующее на ее поверхность, отклонено от нормали на угол внутреннего трения грунта  $\rho$ , и сразу после ее образования, когда произошло изменение действующих сил, и условие  $\delta_1 = \rho$  уже не соблюдается.

Для второго случая уравнения (5.19) и (5.20) преобразуются:

$$q = p \frac{\sin \Delta_1}{\sin(\Delta_1 - \delta_1)} \frac{\sin(\Delta_2 + \delta_2)}{\sin \Delta_2} \exp[(\pi - \Delta_2 - \delta_2 - \Delta_1 + \delta_1 + 2\psi) \operatorname{tg} \rho]. \quad (5.38)$$

Применительно к первому случаю при формировании площадки сдвига уравнение (5.38) упрощается. На площадке сдвига выполняется условие  $\delta_1 = \rho$ , при этом  $\Delta_1 = \frac{\pi}{2}$ . Таким образом, изменяются и уравнения (5.19):

$$\sigma_1 = p \frac{1}{\sin\left(\frac{\pi}{2} - \rho\right)} = \frac{p}{\cos \rho}; \quad \varphi_1 = \frac{\pi}{4} - \frac{\rho}{2} - \psi = \varepsilon - \psi,$$

а уравнения (5.20) не изменяются. Тогда

$$q = p \frac{\sin(\Delta_2 + \delta_2)}{\cos \rho \sin \Delta_2} \exp\left[\left(\frac{\pi}{2} - \Delta_2 - \delta_2 + \rho + 2\psi\right) \operatorname{tg} \rho\right]. \quad (5.39)$$

При движущемся рабочем органе расчеты по-прежнему осуществляются итерационными методами с учетом альтернативного варианта разрушения грунта. Переход к действительному давлению  $q'$  осуществляется по (5.32).

*Расчет рациональной траектории заглубления.* Рассмотрены кинематические особенности разрушения грунта площадкой износа при заглублении. Из рисунка 5.11 видно, что угол  $\varphi_2$  между направлением наибольшего главного напряжения и осью  $x$  полностью определяет положение площадок скольжения в зоне  $OA_2A_3$  и размеры этой зоны, расположенной под площадкой износа  $OA_3$ . Вместе с тем, положение линии  $A_2C$  представляет собой рациональную траекторию заглубления отвала.

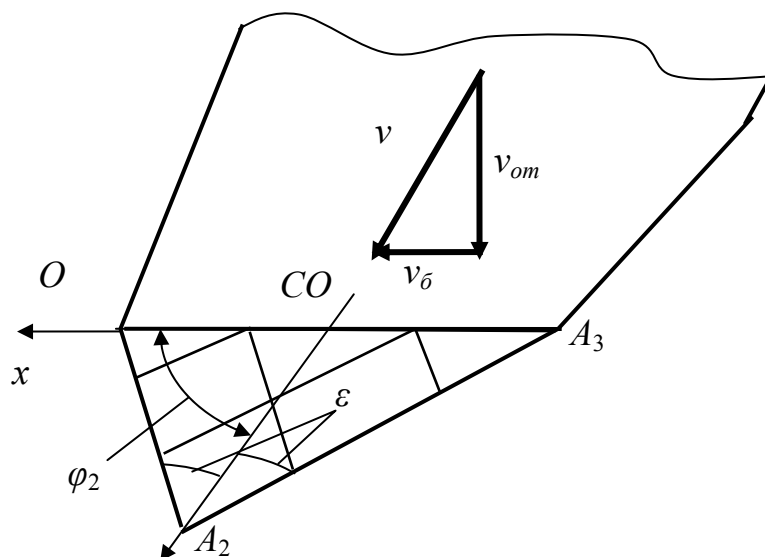


Рисунок 5.11 – Схема к расчету рациональной траектории заглабления

Действительно, напряжения на площадке износа при заглаблении ножа достигнут предельных значений только при некоторой его осадке. При этом, если траектория заглабления режущей кромки будет расположена под углом  $\varphi_2$ , напряжения будут увеличиваться во всей зоне  $OA_2A_3$  до предельных значений. Если же траектория заглабления будет расположена под меньшим углом, то часть площадки износа ножа, примыкающая к режущей кромке, будет попадать на новый участок грунта, который будет испытывать меньшие давления, чем остальные участки площадки износа. Это потребует увеличения заглабляющего усилия.

Таким образом, заглабление отвала под углом

$$\beta = \operatorname{arctg} \frac{v_{om}}{v_0} = \varphi_2 \quad (5.40)$$

обеспечивает появление предельных значений, удовлетворяющих (5.21) сразу во всей зоне  $OA_2A_3$ , расположенной под площадкой износа ножа.

Минимальная величина этого угла будет при  $\delta_2 = \rho$ . В этом случае в соответствии с (5.20)

$$\varphi_2 = \frac{\pi}{2} - \frac{1}{2} \left( \frac{\pi}{2} + \rho \right) = \frac{\pi}{4} - \frac{\rho}{2} = \varepsilon.$$

Давление, действующее на площадку износа при копании без заглубления ножа. Рассматривая интенсивный износ нижней стороны ножей, который наблюдается на практике, можно заключить, что на эту часть ножа действует давление не только при заглублении, но и при копании. Иначе такой быстрый износ нижней стороны ножей невозможно объяснить.

На рисунке 5.12 представлена схема давлений на грунт. После формирования площадки сдвига  $OB$  на нее будет действовать давление  $q'_6$  со стороны перемещаемого потока грунта  $OBKD$ . Это давление действует достаточно продолжительное время – до формирования площадки малого сдвига, выполняющей те же функции по отношению к грунту, расположенному под ней перед ножом, что и площадка  $OB$  при большом сдвиге, а на грунт перед ножом будет действовать давление  $q'_m$ .

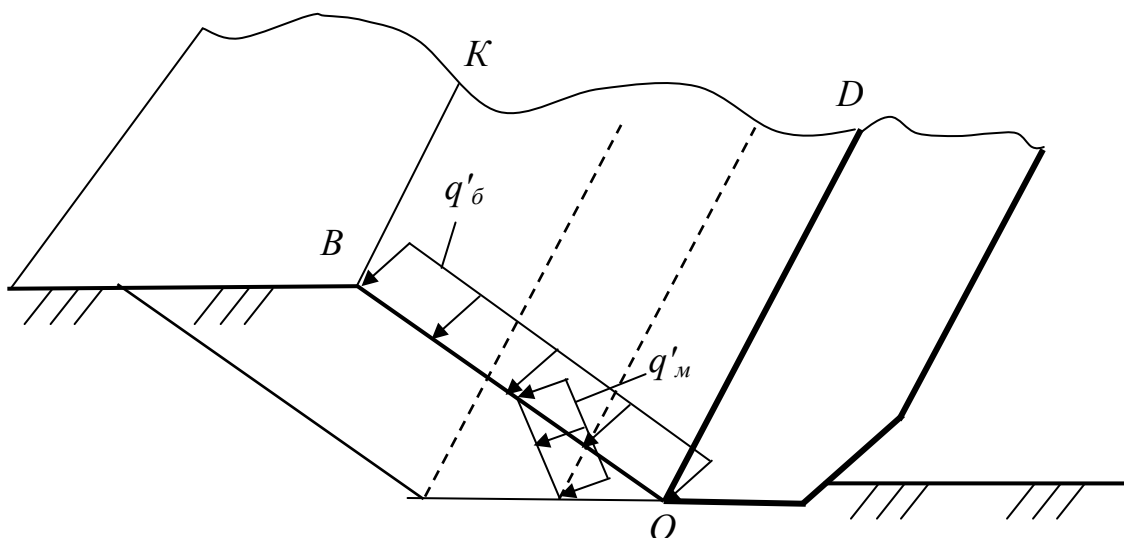


Рисунок 5.12 – Схема давлений на грунт перед режущей кромкой при появлении площадки сдвига

Следовательно, за цикл разрушения на грунт ненарушенной структуры, расположенный перед ножом, действуют достаточно высокие давления. Такие же давления грунт испытывает при малых сдвигах, количество которых за цикл определяется многими факторами [25].

На рисунке 5.13 приведена схема для расчета давлений на площадку износа. Действительное положение площадки сдвига (угол  $\psi$ ) и давление  $q'$ , действующее на нее при больших и малых сдвигах, можно определить по [25].

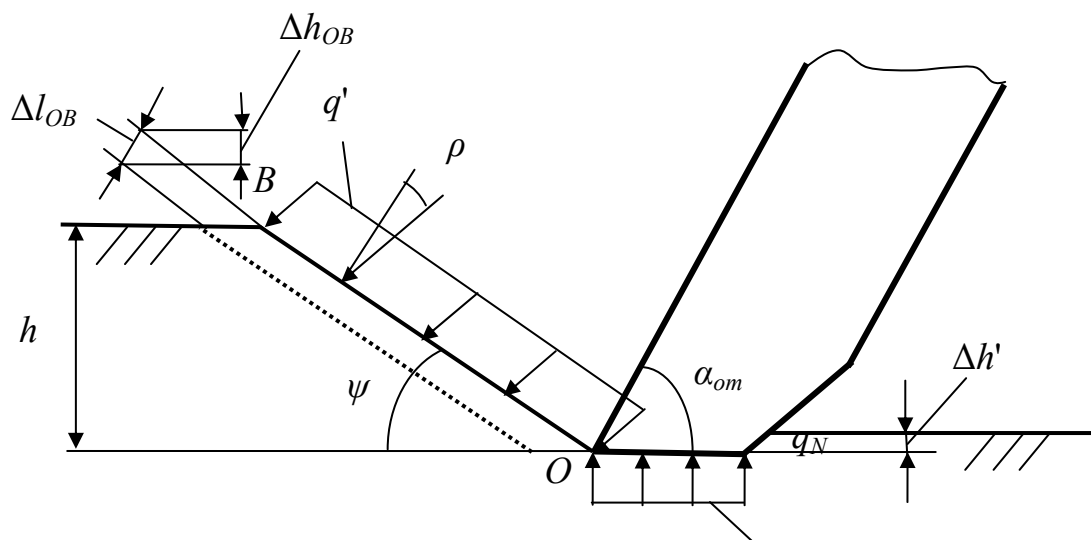


Рисунок 5.13 – Схема для расчета давлений на площадку износа при копании с постоянной толщиной стружки

Под действием давления  $q'$  произойдет некоторое сжатие грунта под площадкой скольжения на величину  $\Delta l_{OB}$ , которая будет пропорциональна нормальному давлению и с учетом (5.3) определится как

$$\Delta l_{OB} = \frac{q' \cos \rho}{K_h}. \quad (5.41)$$

Величина деформации грунта в вертикальной плоскости

$$\Delta h_{OB} = \Delta l_{OB} \cos \psi = \frac{q' \cos \rho \cos \psi}{K_h}. \quad (5.42)$$

Таким образом, под нож попадает грунт, предварительно деформированный на величину  $\Delta h_{OB}$  в вертикальной плоскости. Это приводит к появлению давлений со стороны грунта на площадку износа ножа, препятствующую расширению грунта кверху, величина которых в соответствии с (5.3)

$$q_N = K_h \Delta h_{OB}. \quad (5.43)$$

После прохождения площадки износа с поверхности грунта снимается давление. При этом поверхность грунта поднимется на величину упругих деформаций  $\Delta h'$ .

Таким образом, площадка износа большую часть времени копания (за исключением выглубления отвала) находится под действием значительных по величине давлений, приводящих к ее интенсивному износу. Эти давления создают дополнительную силу трения площадки износа ножа о грунт, которая применительно к схеме на рисунке 5.13 рассчитывается как

$$P_{TP} = q_N cB \operatorname{tg} \omega. \quad (5.44)$$

Таким образом, изложенный метод позволяет рассчитать давление, определяющее износ трущихся поверхностей, следовательно, перейти к рассмотрению скорости изнашивания рабочей поверхности и нижней кромки ножа и уточнить методику тяговых расчетов.

#### **5.4 Исследования заглубления отвала бульдозера**

*Заглубление при непердельных давлениях.* Рассмотрен бульдозер весом 200 кН на базе трактора Т-10М, имеющий длину отвала 3,2 м. Длина  $c$  площадки износа новых ножей этого бульдозера равна 14 мм, а полностью изношенных – около 25 мм.

Максимальное заглубляющее усилие при вывешивании бульдозера на отвале составляет 70 кН. Тогда вертикальное давление, передаваемое на грунт площадкой износа ножа, при  $c = 14$  мм будет  $q_6 = 1560$  кПа, а при  $c = 25$  мм  $q_6 = 875$  кПа.

Численные значения коэффициента  $C_0$  (см. таблицу А.1): для грунтов II категории  $C_0 = 15000$  кН/м<sup>3</sup>, для грунтов III категории  $C_0 = 30000$  кН/м<sup>3</sup>. По (5.2) рассчитывается коэффициент жесткости  $C_h$ .

Для расчета заглубления отвала используется формула (5.13), согласно которой определяется заглубление  $\Delta h$  при перемещении отвала на величину

$$\Delta c = \frac{c}{k},$$

где  $k$  – количество расчетных участков, на которые разбита длина  $c$  площадки износа.

Поэтому заглубление ножа  $h$  при перемещении  $l$  рассчитывается по формуле

$$h = \frac{l\Delta h}{\Delta c}.$$

Далее следует оценить влияние количества расчетных участков площадки износа на точность расчетов. Для этого определяется  $h$  после 100 мм пути при разном количестве участков  $k$ . Результаты расчетов применительно к грунту II категории и новому ножу при давлении на грунт 600 кПа представлены на рисунке 5.14.

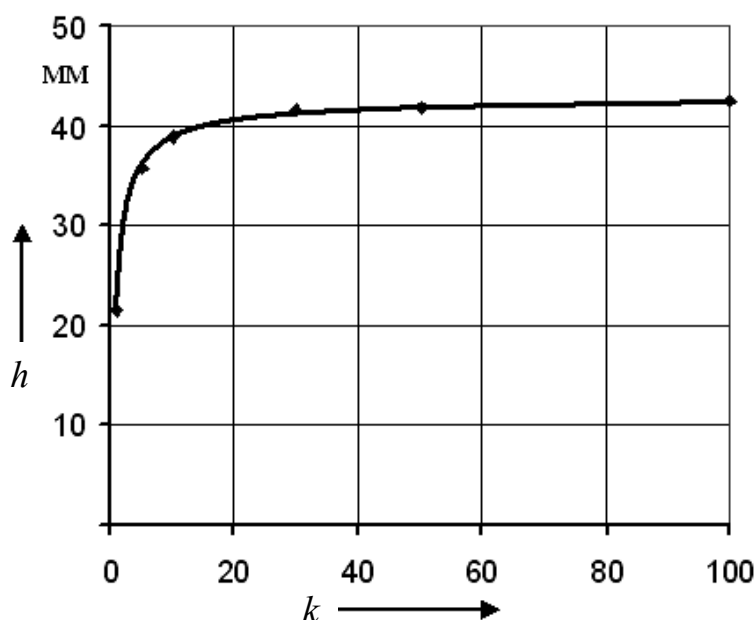


Рисунок 5.14 – Влияние количества  $k$  расчетных участков разбиения площадки износа на результаты расчета

Из рисунка видно, что достаточно большое количество участков (30–50) приводит к стабилизации результатов расчета и почти не оказывает влияния на вычисления.

На рисунке 5.15 отражены результаты расчетов заглубления ножа  $h$  при прохождении им пути  $l = 100$  мм в зависимости от заглубляющего усилия  $N$  для грунта II и III категорий. Для нового ножа с длиной площадки износа  $c = 14$  мм заглубляющее усилие ограничивалось  $N = 26,9$  кН для грунта II категории при  $C_0 = 15000$  кН/м<sup>3</sup>, что соответствует



заглубляющему давлению 600 кПа, и  $N = 44,8$  кН для грунта III категории при  $C_0 = 30000$  кН/м<sup>3</sup>, что соответствует заглубляющему давлению 1000 кПа. Давления 600 и 1000 кПа являются максимальными неразрушающими давлениями в рассматриваемых условиях. Для полностью изношенного ножа, для которого  $c = 25$  мм, для грунта II категории максимальное заглубляющее усилие ограничивается  $N = 48$  кН по тем же причинам, а для грунта III категории –  $N = 70$  кН. Последнее значение  $N$  является максимально возможным заглубляющим усилием из условий вывешивания бульдозера на отвале.

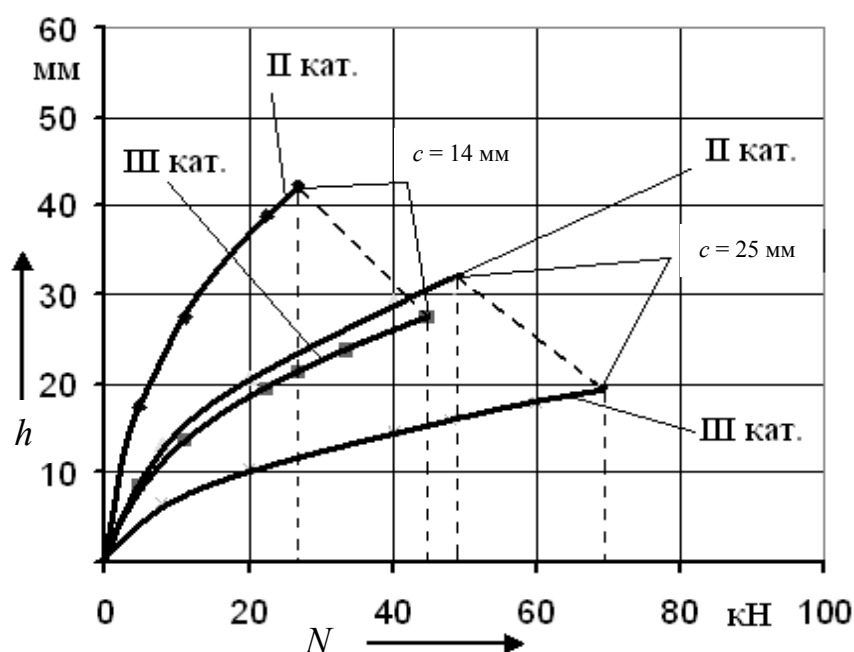


Рисунок 5.15 – Влияние заглубляющего усилия  $N$  на заглубление отвала  $h$  при различных размерах площадки износа  $c$  на грунтах разных категорий

Из рисунка видно, что при одном и том же усилии  $N$  увеличение площадки износа в 1,8 раза (с 14 до 25 мм) примерно во столько же раз уменьшает глубину погружения отвала при одинаковых остальных условиях. Почти так же влияют и свойства грунта, снижающие заглубление отвала  $h$  примерно в 2 раза для грунтов III категории по сравнению с грунтами II категории.

На рисунке 5.16 представлены графики зависимости заглубления отвала  $h$  от пути его перемещения  $l$  в разных условиях при заглубляющем давлении 600 кПа для всех случаев. Графики отражают угол наклона к

горизонталь траектории заглубления отвала. Наибольшим угол  $\alpha = 40^\circ$  будет при заглублении нового ножа в грунт II категории. При заглублении этого же ножа в грунт III категории угол наклона траектории заглубления отвала будет всего  $21^\circ$ . Для полностью изношенного ножа для грунтов II категории  $\alpha = 31^\circ$ , а для грунтов III категории  $\alpha = 15,8^\circ$ .

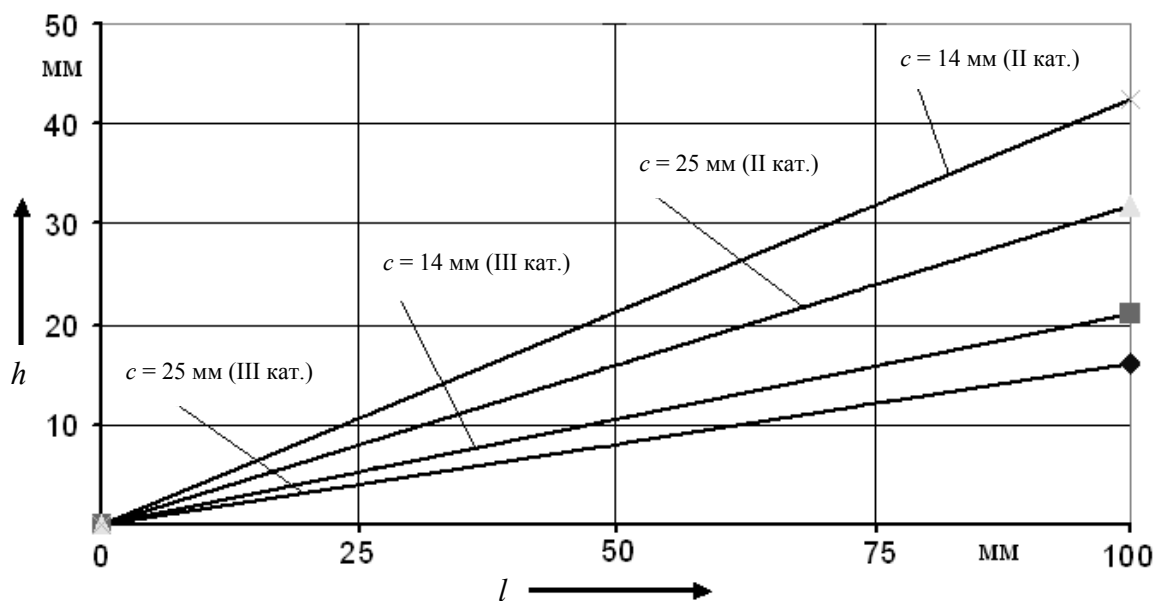


Рисунок 5.16 – Влияние длины площадки износа  $c$  и категории грунта на угол траектории заглубления отвала

Графики (см. рисунок 5.16) можно рассматривать по-другому. Если гидроприводом бульдозера не обеспечивается нужная траектория ( $\alpha > 40^\circ$  при заглублении нового ножа и  $\alpha > 31^\circ$  при заглублении полностью изношенного ножа), то достижение предельных давлений будет невозможным. При малой скорости вертикального перемещения отвала и большой скорости бульдозера грунт под ножом не получит необходимых деформаций для достижения предельных давлений.

Приведенные результаты показывают, что изложенная методика расчета позволяет увязать между собой параметры процесса заглубления рабочего органа за счет деформаций грунта с его геометрическими и силовыми характеристиками, от которых зависит давление на площадке износа, а также с деформационными свойствами разрабатываемого грунта.

Установлено, что при больших скоростях машины и малых скоростях опускания заглубливание рабочего органа будет нерациональным.

*Заглубливание при предельных давлениях.* Рассмотрено заглубливание отвала бульдозера при максимальной высоте призмы волочения 1,3 м и вычислены предельные давления, необходимые для его заглубливания. Основным параметром, определяющим прочностные характеристики грунта, является удельное сцепление, поэтому оно принято за основу.

Если отвал неподвижный (рисунок 5.17, а) и отсутствует призма волочения, давление  $q'$  линейно зависит от удельного сцепления грунта.

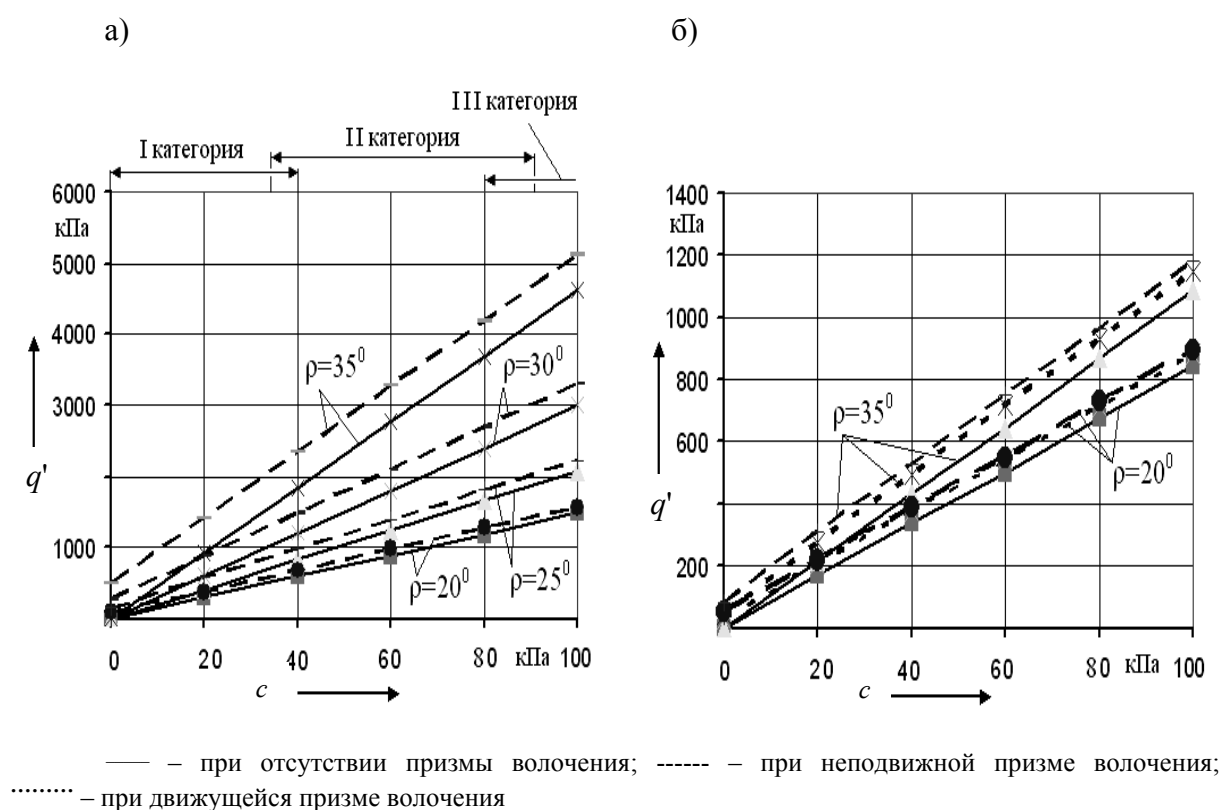


Рисунок 5.17 – Влияние удельного сцепления грунта  $c$  на величину разрушающего давления  $q'$  при неподвижном (а) и движущемся по поверхности грунта (б) отвале

При этом на давление существенно влияет угол внутреннего трения грунта и призма волочения. Но результаты расчетов, показывающие влияние призмы волочения, являются условными, поскольку при неподвижном отвале разрушение грунта произойдет в сторону задней части отвала, свободной от грунта. Если сравнить рекомендуемые значения вертикального давления (см. таблицу 5.1) со значениями на

рисунке 5.17, а, то можно заметить их соответствие при угле внутреннего трения грунта  $\rho = 30^\circ$ , наиболее характерного для супесей.

При заглаблении движущегося отвала (рисунок 5.17, б) происходит резкое уменьшение разрушающего давления по сравнению с заглаблением неподвижного отвала. Призма волочения, как и в предыдущем случае, ухудшает процесс заглабления отвала, но разрушающее давление будет несколько меньшим при движущейся призме волочения.

Далее рассматривается заглабление отвала при копании грунта. Для расчета угла сдвига и действующих на площадку сдвига давлений использовалась специальная методика [57]. На рисунке 5.18 изображены результаты расчетов при копании с толщиной стружки 0,05 и 0,2 м. Данные значения охватывают диапазон реальных значений толщины стружки при работе бульдозера. Расчеты приведены для грунта, угол внутреннего трения которого равен  $30^\circ$  ( $\rho = 30^\circ$ ).

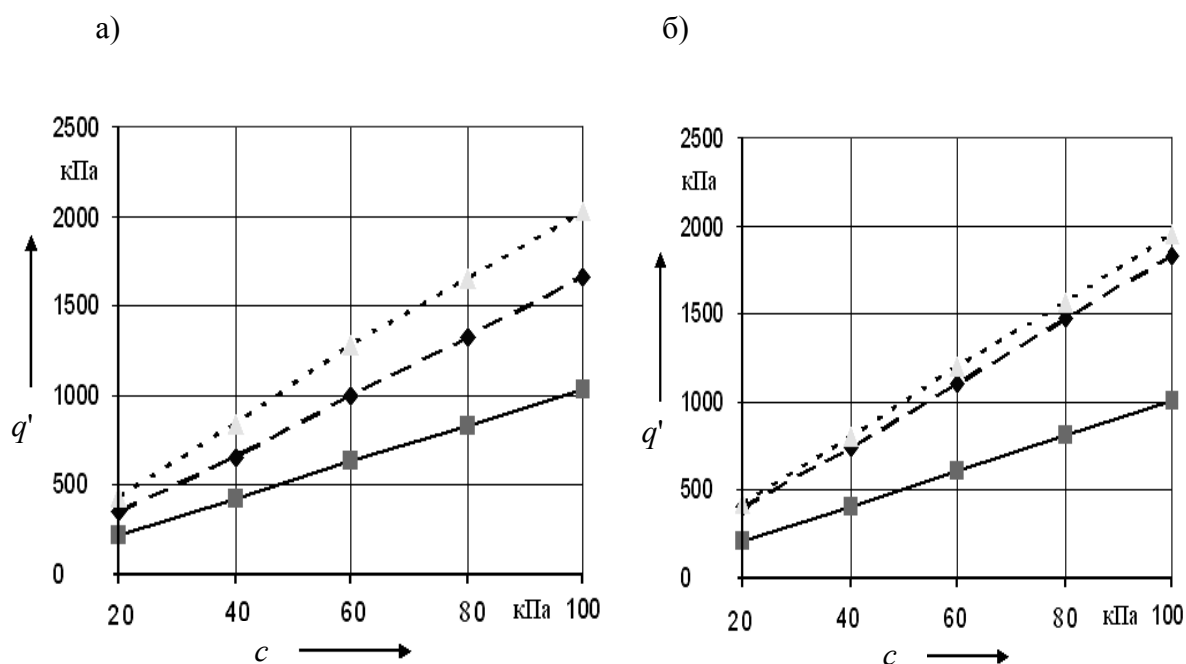


Рисунок 5.18 – Влияние удельного сцепления грунта  $c$  на разрушающее давление  $q'$  ( $h = 0,05$  м (а) и  $h = 0,2$  м (б)) при неподвижной призме волочения (штриховая линия), в момент формирования (сплошная линия) и после окончания формирования площадки сдвига (точечная линия)

Из рисунков видно, что наиболее легко отвал заглабляется непосредственно в момент большого сдвига, а наиболее трудно – сразу

после появления устойчивой площадки сдвига. Так, если при  $c = 100$  кПа в первом случае для разрушения грунта при  $h = 0,05$  м требуется давление 1030 кПа, то во втором почти в 2 раза больше – 2030 кПа. При  $h = 0,2$  м эти цифры равны 1010 и 1950 кПа соответственно. Отсюда можно сделать вывод, что при заглублении отвала действуют значительные колебания силы сопротивления грунта заглублению так же, как это происходит и с силой сопротивления копанию [25].

Причиной этих колебаний является разрушение сцепления грунта на площадке сдвига при копании, которое вызывает скачкообразное изменение сил, действующих в зоне разрушения грунта ножом. Но если сила сопротивления копанию при сдвиге грунта уменьшается, то разрушающее давление, а значит, и сила, требуемая для заглубления отвала, увеличиваются.

Расчеты показывают, что при движущемся отвале альтернативное разрушение грунта в сторону задней части отвала невозможно, т. к. для этого в рассматриваемых условиях требуется давление в 3,2–5,7 раз выше.

Таким образом, наиболее легкое заглубление отвала бульдозера обеспечивается при движущемся отвале при отсутствии призмы волочения и в момент формирования площадки большого сдвига.

*Оценка рациональной траектории заглубления рабочего органа.* Логично заключить, что рациональный угол траектории заглубления отвала, ограниченный, с одной стороны, формулой (5.40), не должен превышать угол резания. Это следует из того, что разрушающее давление при заглублении отвала будет меньшим при движущейся призме. Но это, с другой стороны, ограничивает рациональный угол траектории заглубления отвала, что приводит к условию

$$\varphi_2 = \beta \leq \alpha_{om}.$$

В это уравнение подставлены численные значения, полученные при наиболее характерном для грунтов угле внутреннего трения  $\rho = 30^\circ$ , определено, что при всех значениях удельного сцепления грунта для рассматриваемых условий границы диапазона

$$50^\circ = \alpha_s \leq 55^\circ.$$

*Оценка давлений, действующих на площадку износа при копании.* Рассмотрена работа бульдозера на типовом грунте, имеющем угол

внутреннего трения  $\rho = 30^\circ$  и удельное сцепление  $c = 40$  кПа. Результаты расчета представлены на рисунке 5.19.

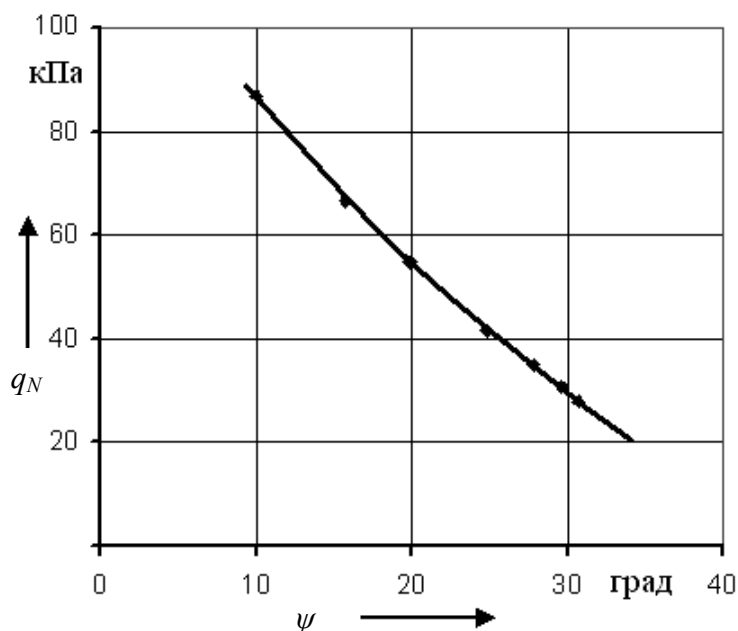


Рисунок 5.19 – Изменение давления  $q$ , действующего на площадку сдвига в зависимости от угла сдвига  $\psi$

Из этого рисунка видно, что давление  $q_N$  увеличивается по мере накопления грунта в призме волочения перед отвалом. Так, при угле сдвига  $\psi = 30^\circ$  (в начале копания) давление  $q_N = 29$  кПа, в конце копания при  $\psi = 15^\circ$   $q_N = 69$  кПа, а при  $\psi = 10^\circ$   $q_N = 85$  кПа, что весьма существенно. В этих условиях в начале копания ( $\psi = 30^\circ$ ) сила  $P_N$ , действующая со стороны грунта на площадку износа ножей отвала при ее длине 14 мм, будет равна 1,3 кН, а при длине площадки износа 25 мм – 2,32 кН. В конце копания при  $\psi = 10^\circ$  и длине площадки износа 14 мм  $P_N = 3,8$  кН, а при длине площадки износа 25 мм  $P_N = 6,8$  кН. Возникающая сила трения площадки износа о грунт в конце копания при длине площадки износа 14 мм будет равна 2 кН, а при длине площадки износа 25 мм – 3,6 кН. Если учесть, что сопротивление передвижению бульдозера весом 200 кН около 20 кН, то дополнительное сопротивление из-за трения ножа по грунту составляет 10–18 % от сопротивления передвижению бульдозера  $P_f$ .

Таким образом, при копании грунта на площадку износа даже при отсутствии заглабления ножа постоянно действуют вертикальные давления. 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 заглавлении ножа, приводят к интенсивному износу нижней стороны ножа.

### ***Выводы***

На основании анализа работы землеройно-транспортных машин установлены факторы, оказывающие наибольшее влияние на процесс заглабления рабочего органа, выбраны расчетные положения, наиболее полно характеризующие этот процесс, и разработаны методы расчета параметров.

Проведенные исследования позволили выявить особенности взаимодействия с грунтом затупленных ножей при их заглавлении, подтвердили актуальность изложенной методики, поскольку ее изучение позволяет перейти к конструктивным способам снижения возникающих при заглавлении рабочего органа сопротивлений, вследствие чего повысится производительность бульдозера.

## 6 Сопротивление грунта разрушению грунтозацепами траков гусеничных машин

### 6.1 Общие сведения

Тягово-сцепные качества гусеничной машины являются одними из важнейших эксплуатационных показателей. При проектировании гусеничных машин перед конструктором ставится задача выбора параметров трактора и его ходовой части, которые обеспечили бы наилучшие тяговые качества, особенно важные для землеройно-транспортных машин (ЗТМ).

Результаты, полученные специалистами в данной отрасли, свидетельствуют о значительном влиянии геометрических параметров траков с грунтозацепами на силу тяги по сцеплению гусеничных машин. Проблема улучшения тяговых качеств ЗТМ решалась учеными во многих странах мира, однако эти исследования, как правило, являются экспериментальными, что ограничивает их применение.

Большая часть существующих методов расчета силы тяги по сцеплению базируется на той или иной определенной расчетной схеме, которая недостаточно полно учитывает параметры грунтозацепов и физико-механические свойства грунта и, главное, не рассматривает последовательность и альтернативные возможности разрушения грунта при увеличении нагрузки на грунтозацеп.

Обычно расположение площадок скольжения и форму тела скольжения грунта под траком гусеницы в момент предельного равновесия принимают на основе теории взаимодействия «крутых подпорных стенок» с грунтом В. В. Соколовского [17]. Например, принятая в [58] схема представлена на рисунке 6.1.

Положение площадки скольжения *AFDC* получено без учета наиболее опасного случая нагружения, при котором устойчивость грунта между грунтозацепами будет минимальной [28]. Этот случай сопровождается второй фазой разрушения грунта, когда последовательно разрушаются слои грунта, примыкающие к начальной площадке скольжения *AB*. Кроме того, такие схемы почти не рассматривают другие возможные варианты разрушения грунта и, следовательно, не в полной степени описывают взаимодействие траков с грунтом.



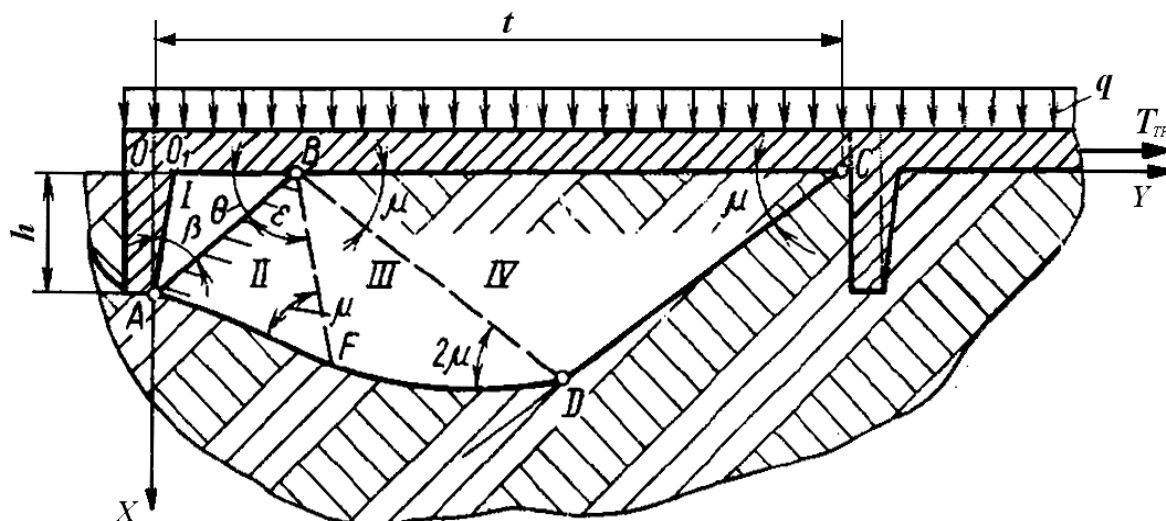


Рисунок 6.1 – Схема взаимодействия трака гусеницы с грунтом

## 6.2 Обоснование расчетной схемы

Закон распределения продольных реакций грунта по передним граням грунтозацепов гусеничной цепи является одной из важнейших характеристик при определении силы тяги по сцеплению гусеничной машины. Правильное определение этого закона – основной этап при создании метода расчета общего сопротивления, оказываемого грунтом на гусеничный движитель.

Исследования многих авторов [59–62] показывают, что распределение продольных реакций грунта по передним граням грунтозацепов зависит от разных эксплуатационных и конструктивных факторов.

При этом продольная нагрузка на передние грани грунтозацепов не будет одинаковой (рисунок 6.2). Опускание очередного переднего грунтозацепа в грунт не вызывает перераспределения продольной нагрузки по ранее заглубленным грунтозацепам, т. к. они обеспечивают требуемое тяговое усилие. Но как только будет поднят из грунта задний грунтозацеп, продольные реакции, действующие на передние грани остальных грунтозацепов, должны будут перераспределиться, компенсируя его отсутствие. При этом произойдет дополнительное прессование грунта на ширину  $\Delta$  оставшимися в нем грунтозацепами, включая и передний. Но если у переднего грунтозацепа это будет первая подпрессовка, то у предшествующего она будет уже второй. Следовательно, каждый последующий грунтозацеп имеет общее количество подпрессовок на

единицу больше, чем предыдущий. Последний грунтозацеп спрессует грунт на  $\Delta n$ , где  $n$  – число нагруженных грунтозацепов.

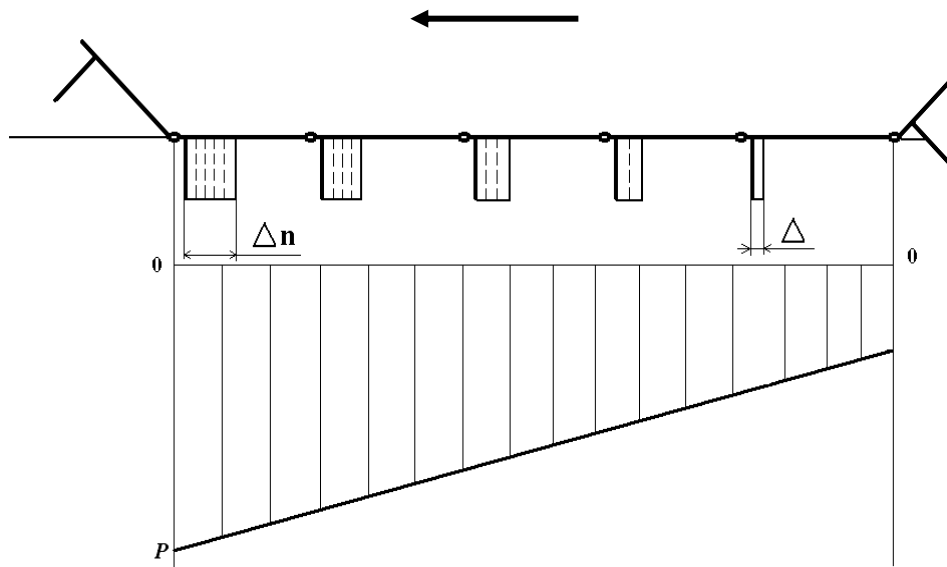


Рисунок 6.2 – Схема подпрессовки грунта грунтозацепами

*Примечание* – На рисунке 6.2 и всех последующих рисунках вверху стрелкой показано направление смещения гусеницы относительно грунта.

При определенном значении суммарной подпрессовки произойдет разрушение грунта под задним траком гусеницы. Срез грунта задним грунтозацепом приводит к перераспределению продольных усилий на остальных грунтозацепах. Прирост касательной силы у предпоследнего грунтозацепа ( $n-1$ ) вызовет дополнительную деформацию, что может привести к срезу грунта под траком ( $n-1$ ). Аналогично рассматривая последующие траки, можно прийти к выводу о неминуемости полного среза грунта под гусеницей при срезе грунта задним грунтозацепом. Такое взаимодействие грунтозацепов с грунтом приведено в [60], а также рассматривается в [59, 61].

В [60, 61] используется линейный закон распределения продольных реакций грунта по передним граням грунтозацепов, расположенных на одной гусенице. Но существуют и другие данные [63, 64]. Поскольку линейный закон является наиболее распространенным, то он применяется при переходе к расчету силы тяги по сцеплению, реализуемой гусеничным движителем.

Кроме сил, действующих на передние грани грунтозацепов, на траки гусеничной цепи действуют силы трения опорных частей траков о грунт, в результате чего эпюра распределения продольных реакций грунта по тракам принимает вид трапеции (см. рисунок 6.2).

Последний трак является наиболее нагруженным. Поэтому рассматривается последовательность процессов, протекающих в грунте, расположенном под траком, при постепенном увеличении внешней касательной силы, приложенной к траку.

До преодоления внешней силой силы трения опорной части трака и вершины грунтозацепа о грунт смещение движителя относительно опорной поверхности отсутствует. При превышении силы трения начнется смещение трака, и дополнительное воздействие на грунтозацеп будет оказывать сила, возникающая вследствие деформации грунта.

В ряде работ отмечается, что процесс разрушения грунта грунтозацепом во многом аналогичен процессу резания [58, 63] в специфических условиях. Поэтому для расчета силы, действующей на переднюю грань грунтозацепа, можно использовать положения, изложенные в разделах 1 и 2 и в [25].

Для расчета начальной (первой) фазы разрушения можно применить положения теории пассивного давления грунта на подпорные стенки. Рассматривая первичное разрушение грунта, следует иметь в виду, что возможен и такой случай, когда сразу срежется весь «кирпич» грунта, расположенного между грунтозацепами. Это возможно, если сила, необходимая для среза «кирпича» грунта, будет меньше силы, при которой образуется первичная площадка скольжения  $OB'$ , а также если первичная площадка скольжения выйдет за пределы удерживающей поверхности  $AK$  грунта, т. е.  $\psi < \psi_{кр}^I$  (рисунок 6.3). В последнем случае это происходит вследствие того, что удерживающей поверхностью будет являться менее устойчивая поверхность  $AT$ , свободная от давлений из-за отодвигания предыдущего грунтозацепа [25].

Если срез «кирпича» грунта при данном значении внешней касательной силы не образуется, то при дальнейшем увеличении силы наступает последующая (вторая) фаза разрушения. Во время этой фазы (рисунок 6.4) увеличивается зона предельного напряженного состояния грунта, ограниченная первичной площадкой скольжения  $OB'$  до какого-то нового ее положения  $OB$ , обеспечивающего устойчивость грунта к дальнейшему разрушению при значительном выпрямлении площадки

скольжения (см. раздел 1). При этом призма грунта  $OB'K$  не может перемещаться вертикально, что является особенностью этой фазы по сравнению с резанием грунта.

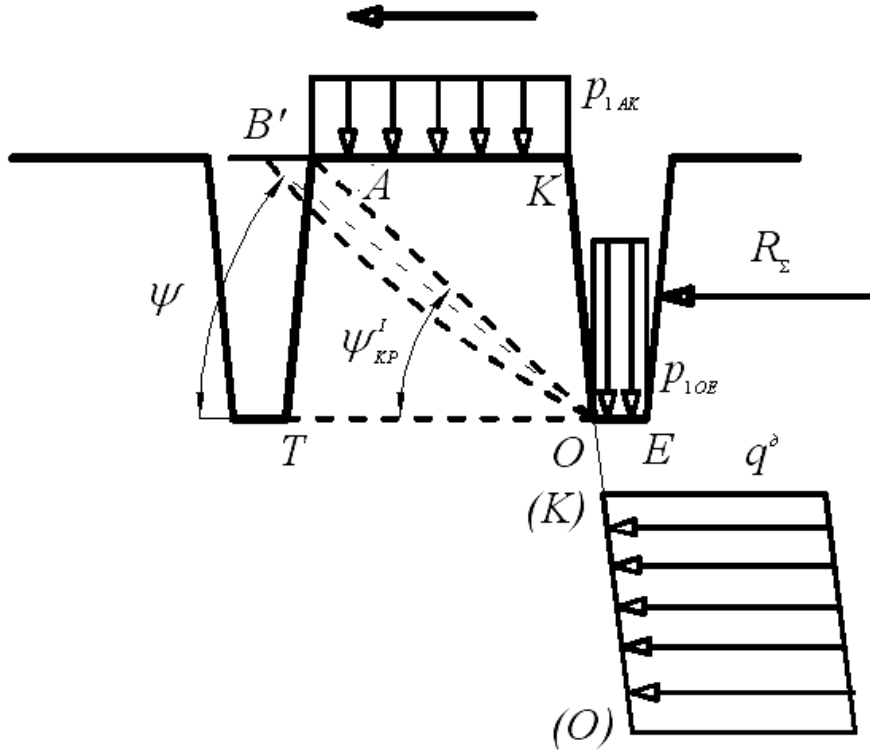


Рисунок 6.3 – Положение критического угла  $\psi_{KP}^I$

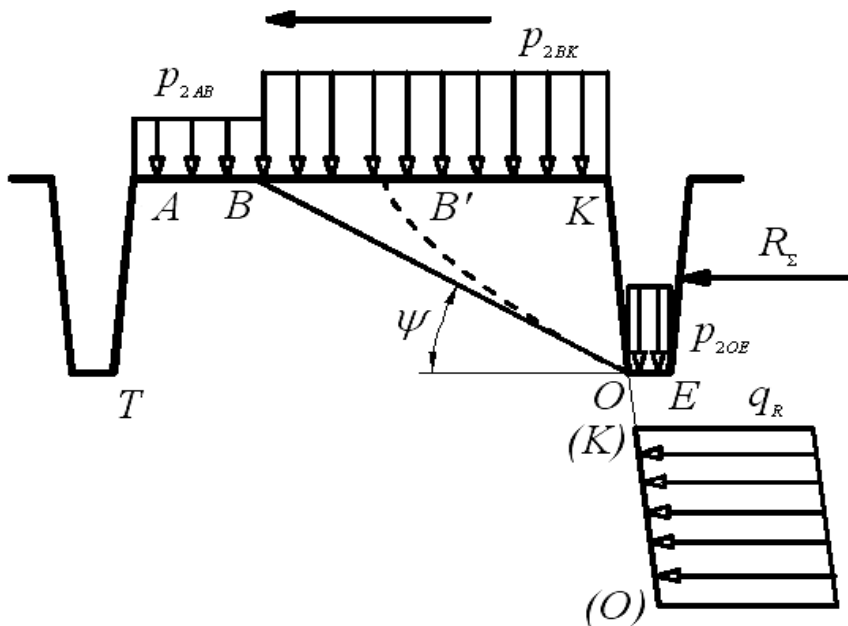


Рисунок 6.4 – Схема переформирования площадки скольжения

При расчетах второй фазы необходимо не только контролировать положение площадки скольжения  $OB$  относительно критического значения  $\psi_{KP}^I$ , но и проверять возможность среза оставшейся части грунта ненарушенной структуры  $TABO$  (рисунок 6.5).

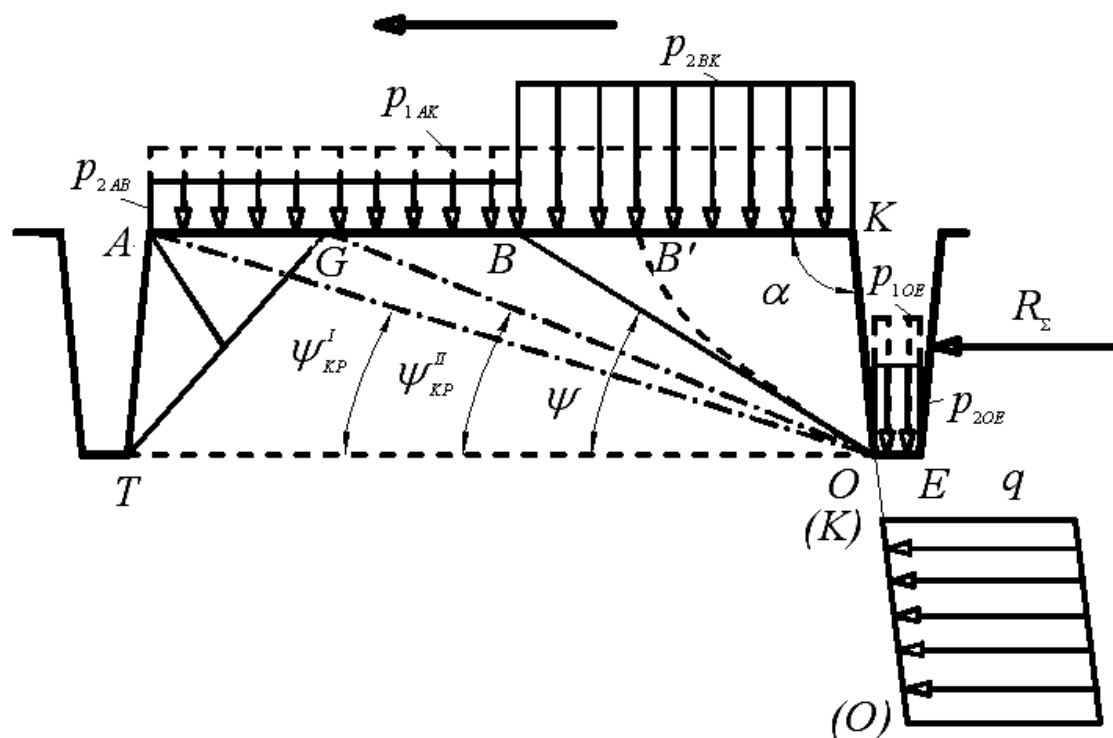


Рисунок 6.5 – Общая схема разрушения грунта между грунтозацепами

Кроме этого, следует проверять устойчивость грунта у задней грани грунтозацепа, где может произойти разрушение от давления, действующего со стороны опорной части трака. В свою очередь, это приведет к увеличению критического значения угла  $\psi_{KP}^{II}$  (см. рисунок 6.5). Возможность такого разрушения отмечена и в [63].

Таким образом, внешняя касательная сила, приложенная к траку, может увеличиваться до тех пор, пока либо полностью будет использована несущая способность грунта и образуется его срез между соседними грунтозацепами, либо произойдет выклинивание трака вытесняемой призмой грунта. Последний случай возможен при условии, что сила, действующая со стороны вытесняемой призмы  $OBK$  на опорную часть трака, превысит силу тяжести трактора, приходящуюся на этот трак (рисунок 6.6). Возможность такого выклинивания отмечалась и в [58, 63].

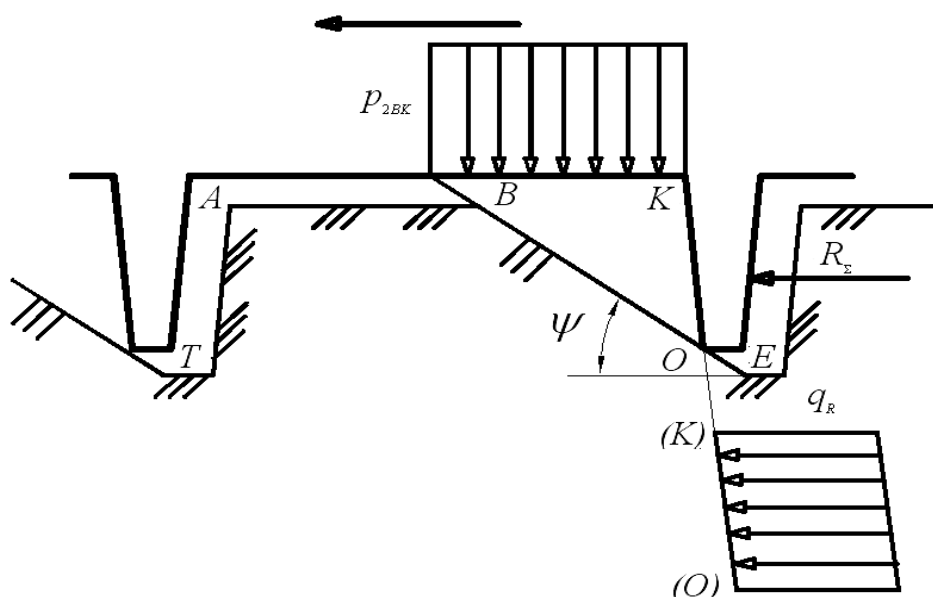


Рисунок 6.6 – Схема выклинивания трака из грунта

### 6.3 Расчет касательной силы тяги

*Расчет усилий в начальной фазе разрушения грунта.* Рассматривается расчетная схема на рисунке 6.7. Предельное давление, действующее на переднюю грань грунтозацепа, и положение первичной площадки скольжения можно определить, приняв за подпорную стенку грань  $OK$  грунтозацепа, а за засыпку – поверхность грунта  $AK$ , находящуюся под опорной частью трака.

При деформации грунта грунтозацепом трак будет смещаться относительно грунтового «кирпича», вследствие чего действительное давление  $p_{AK}^{\circ}$ , действующее со стороны опорной части трака на поверхность  $AK$ , будет отклонено от нормали к этой поверхности под углом внешнего трения  $\omega$  и рассчитано как

$$p_{AK}^{\circ} = \frac{P_{1AK}}{\cos \omega}, \quad (6.1)$$

где  $p_{1AK}$  – нормальное давление, действующее со стороны опорной поверхности трака на грунт, определяемое исходя из весовых нагрузок трактора.

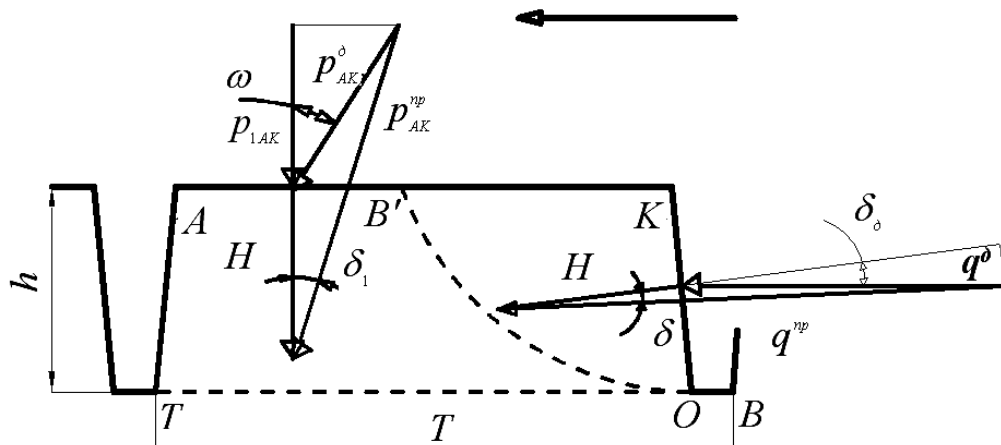


Рисунок 6.7 – Расчетная схема начальной фазы разрушения грунта

Так как трак с грунтозацепом являются твердыми недеформируемыми телами, то при погружении в грунт их можно представить в виде жесткого штампа. Следовательно, перераспределение нормального давления  $p_{1AK}$ , действующего на грунт со стороны опорной части трака, и нормального давления  $p_{1OE}$ , действующего со стороны вершины грунтозацепа, можно учесть, используя теорию линейно деформируемых тел для расчета осадки жестких штампов [65].

Приведенное давление равно геометрической сумме действительного давления и давления связности грунта:

$$p_{AK}^{np} = \sqrt{(p_{AK}^{\delta} \cos \omega + H)^2 + (p_{AK}^{\delta} \sin \omega)^2}. \quad (6.2)$$

Это давление отклонено от нормали под углом

$$\delta_1 = \arcsin\left(\frac{p_{AK}^{\delta} \sin \omega}{p_{AK}^{np}}\right). \quad (6.3)$$

Зная давление на поверхности засыпки  $p_{AK}^{np}$  и угол его отклонения  $\delta_1$ , предельное приведенное давление  $q^{np}$ , действующее на переднюю грань грунтозацепа, и угол его отклонения  $\delta$  можно определить по уравнениям пассивного давления грунта на подпорные стенки [17, 66, 67] с учетом изложенных ниже особенностей расчета.

Во-первых, угол отклонения приведенного давления, действующего на грунт со стороны подпорной стенки, зависит не только от угла внешнего трения, но и от действительного давления, поскольку приведенное давление является геометрической суммой действительного давления и давления связности, которое нормально к поверхности грунта (см. рисунок 6.7).

Во-вторых, ввиду того, что до начала разрушения грунта и появления в нем площадок скольжения подпорная стенка проходит некоторый путь вследствие сжимаемости грунта, можно предположить, что направление действия сил трения, зависящее от смещения грунта относительно поверхности подпорной стенки, будет зависеть и от угла ее наклона.

Если учет давления связности не вызывает затруднений, т. к. используются итерационные методы расчета, то последнее предположение потребовало проведения экспериментальной проверки [68], которая показала следующее.

Смещение грунта относительно поверхности подпорной стенки при ее надвигании на грунт наблюдается только тогда, когда нормаль к подпорной стенке отклонена от направления движения в ту или иную сторону на угол  $\delta^1$ , превышающий угол внешнего трения грунта  $\omega$  (рисунок 6.8, а, б).

В этом случае составляющие действительного давления  $q^0$  (нормальная  $\sigma$  и касательная  $\tau$ ) связаны зависимостью

$$\tau = \sigma \operatorname{tg} \omega.$$

В противном случае (рисунок 6.8, в–д)

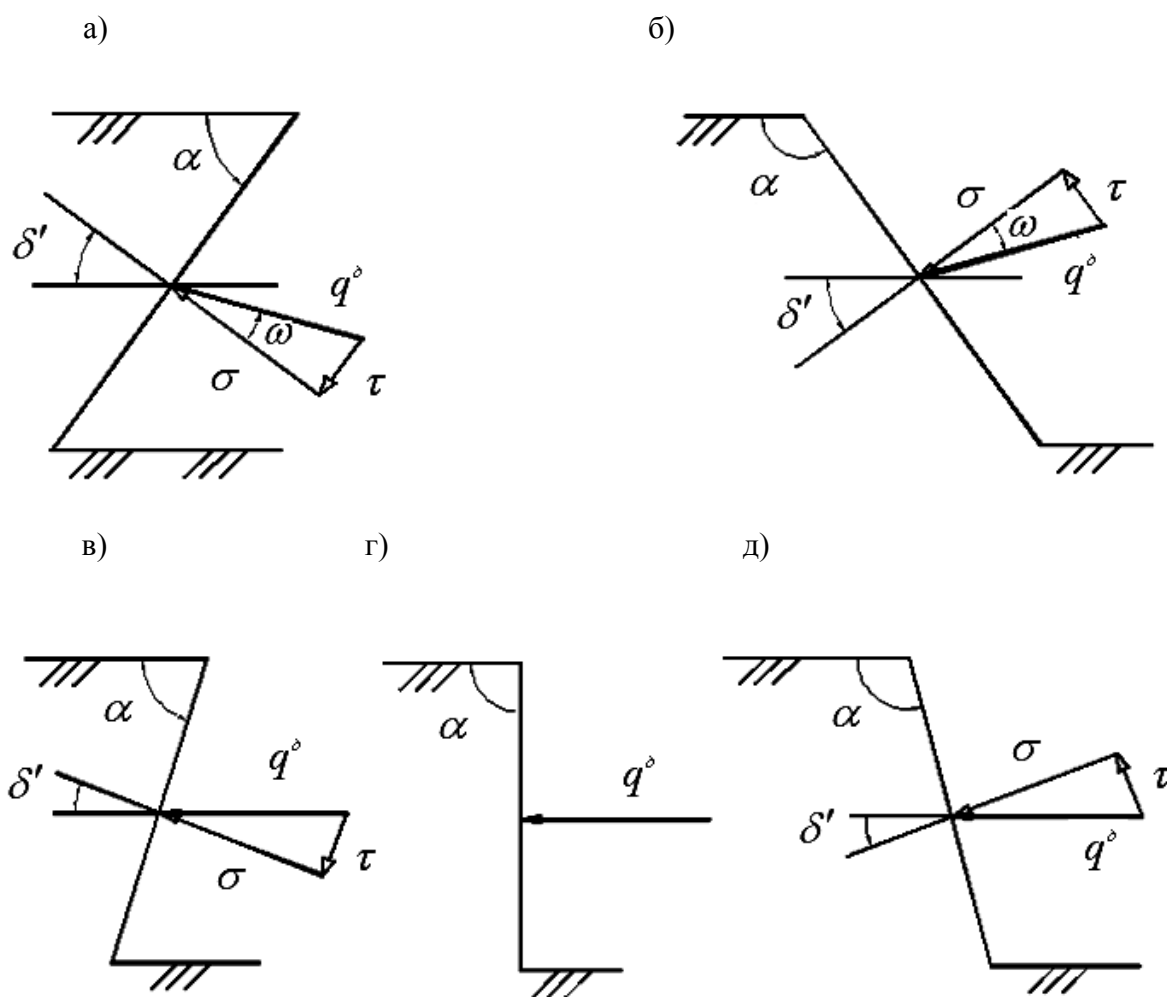
$$\tau = \sigma \operatorname{tg} \delta^1 .$$

При этом  $\delta^1 < \omega$ , а это значит, что в данных условиях смещения грунта относительно подпорной стенки не происходит.

В частном случае (см. рисунок 6.8, г) при  $\delta^1 = 0$  давление будет нормальным ( $\tau = 0$ ,  $q^0 = \sigma$ ).

Особенности, выявленные экспериментальным путем, необходимо учитывать при расчетах подпорных стенок.





а, б – при  $\delta^1 > \omega$ ; в, д – при  $\delta^1 < \omega$ ; г – при  $\delta^1 = 0$

Рисунок 6.8 – Схемы направления давлений, действующих на подпорную стенку

Расчет подпорных стенок с малым углом наклона (см. рисунок 6.8, а) не изменяется по сравнению с общепринятыми методами расчета. Область существования таких подпорных стенок ограничивается условием

$$\alpha < \frac{\pi}{2} - \omega.$$

Соответственно, подпорные стенки с большим углом наклона (см. рисунок 6.8, б) будут существовать при условии  $\alpha > \frac{\pi}{2} + \omega$ . Для таких подпорных стенок силы трения, действующие на грунт, будут направлены к их вершинам. Поскольку от направления действия давления зависит пространственное расположение зоны предельного напряженного состоя-

ния грунта, примыкающего к подпорной стенке, то изменятся в этом случае и другие параметры, в том числе и разрушающее давление.

В диапазоне углов  $\frac{\pi}{2} - \omega < \alpha < \frac{\pi}{2} + \omega$  расположены промежуточные подпорные стенки, при перемещении которых отсутствует смещение грунта относительно поверхности подпорной стенки вплоть до момента его разрушения и появления в грунте площадок скольжения. Для таких подпорных стенок можно считать, что угол отклонения действительного давления определяется по уравнению

$$\delta_0 = \left| \alpha - \frac{\pi}{2} \right| \leq \omega. \quad (6.4)$$

В частном случае при значении угла наклона подпорных стенок  $\alpha = \frac{\pi}{2}$  (см. рисунок 6.8, г) давление, действующее с их стороны на грунт, будет нормальным. При углах наклона подпорных стенок, находящихся в пределах  $\frac{\pi}{2} - \omega < \alpha < \frac{\pi}{2}$  (см. рисунок 6.8, в), касательные напряжения направлены к их основанию, а при углах в пределах  $\frac{\pi}{2} < \alpha < \frac{\pi}{2} + \omega$  (см. рисунок 6.8, д) – к их вершине.

Поскольку неизвестными являются как приведенное давление, действующее на переднюю грань грунтозацепа, так и угол его отклонения, расчеты следует вести итерационными методами.

Суть такого расчета сводится к следующему. Принимается численное значение действительного давления  $q^0$ . Для этого значения давление  $q^{np}$  и угол его отклонения  $\delta$  определяются из схемы на рисунке 6.7. Полученное значение  $q^{np}$  сравнивается с вычисленным по методу подпорных стенок значением этого же давления. При их несовпадении соответствующим образом подбирается новое значение действительного давления  $q^0$ , и расчеты повторяются до получения результата с требуемой точностью.

После этого можно рассчитать геометрические размеры зоны разрушения грунта и положение первичной площадки скольжения.

При известных давлениях и геометрических размерах зон разрушения в начальной фазе можно перейти к расчету сил, действующих на переднюю грань грунтозацепа и трак в целом, для рассматриваемого случая.

Касательная сила, действующая на переднюю грань грунтозацепа с углом наклона, лежащим в диапазоне  $\frac{\pi}{2} - \omega < \alpha < \frac{\pi}{2} + \omega$ , определяется по уравнению

$$R_{OK}^I = q^{\delta} S_{OK}, \quad (6.5)$$

где  $S_{OK}$  – площадь поверхности передней грани грунтозацепа,  
 $S_{OK} = Bl_{OK}$ ;

$B$  – ширина трака;

$l_{OK}$  – длина грани  $OK$ .

В противном случае

$$R_{OK}^I = q^{\delta} S_{OK} \cos(\delta^1 - \omega). \quad (6.6)$$

Дополнительное сопротивление оказывают силы сцепления и трения грунта, действующие по боковым поверхностям отделенной призмы  $OB'K$ .

Сила сцепления, действующая по двум боковым поверхностям,

$$C_{OB'K}^I = 2S_{OB'K}c, \quad (6.7)$$

где  $S_{OB'K}$  – площадь боковой поверхности, которую упрощенно можно считать как

$$S_{OB'K} = \frac{1}{2}(l_{B'K}h), \quad (6.8)$$

где  $l_{B'K}$  – длина участка  $B'K$ ;

$h$  – высота грунтозацепов.

Если принять за главное напряжение действительное разрушающее давление  $q^{\delta}$ , то давление на боковую поверхность отделенной призмы будет рассчитываться как

$$q_{OB'K} = q^{\delta} \xi, \quad (6.9)$$

где  $\xi$  – коэффициент бокового давления.

Тогда величина силы трения по двум боковым поверхностям

$$F_{OB'K}^I = 2S_{OB'K} q_{OB'K} \operatorname{tg} \rho . \quad (6.10)$$

Полная величина силы, действующей на переднюю грань грунтозацепа, определится следующим образом:

$$R^I = R_{OK}^I + C_{OB'K}^I + F_{OB'K}^I = R_{OK}^I + 2S_{OB'K} (c + \xi q^0 \operatorname{tg} \rho) . \quad (6.11)$$

С учетом силы трения вершины грунтозацепа  $OE$  и опорной части  $AK$  трака о грунт получена касательная сила, действующая на трак гусеничной цепи при появлении первичной площадки скольжения  $OB'$ :

$$R_{\Sigma}^I = R^I + F_{AK}^I + F_{OE}^I , \quad (6.12)$$

где  $F_{AK}^I$  и  $F_{OE}^I$  – силы трения опорной части трака и вершины грунтозацепа о неподвижный грунт,

$$F_{AK}^I = p_{1AK} (T - l_{OE}) B \operatorname{tg} \omega ; \quad (6.13)$$

$$F_{OE}^I = p_{1OE} l_{OE} B \operatorname{tg} \omega , \quad (6.14)$$

где  $p_{1OE}$  – нормальное давление, действующее на грунт со стороны вершины грунтозацепа;

$T$  – шаг грунтозацепов;

$l_{OE}$  – ширина вершины грунтозацепа.

Таким образом, получены уравнения, позволяющие определить силы, действующие на переднюю грань грунтозацепа и на трак гусеничной цепи во время начальной фазы разрушения грунта при образовании первичной площадки скольжения.

Следует иметь в виду, что при определенных условиях разрушение грунта может произойти и при меньшем значении силы  $R^I$ , рассчитанной по (6.11). Для проверки такого предположения необходимо рассмотреть возможность среза грунтового «кирпича»  $ТАКО$ , находящегося между

соседними грунтозацепами. В этом случае касательная сила, действующая на переднюю грань грунтозацепа, будет определяться силами сцепления и трения грунта, действующими по основанию, а также по боковым торцам этого «кирпича»:

$$R^0 = F_{OT} + C_{OT} + F_{ТАКО} + C_{ТАКО}, \quad (6.15)$$

где  $F_{OT}$ ,  $F_{ТАКО}$  – силы трения, действующие по основанию и двум боковым торцам грунтового «кирпича»;

$C_{OT}$ ,  $C_{ТАКО}$  – силы сцепления грунта, действующие по тем же площадкам.

В данном случае

$$F_{OT} = B(T - l_{OE})p_{1AK} \operatorname{tg} \rho. \quad (6.16)$$

Если за главное напряжение принять давление  $p_{1AK}$  со стороны опорной части трака, то можно получить, что

$$F_{ТАКО} = 2S_{ТАКО} \xi p_{1AK} \operatorname{tg} \rho; \quad (6.17)$$

$$C_{OT} = B(T - l_{OE})c; \quad (6.18)$$

$$C_{ТАКО} = 2S_{ТАКО}c, \quad (6.19)$$

где  $S_{ТАКО}$  – площадь бокового торца грунтового «кирпича».

Упрощенно можно считать, что

$$S_{ТАКО} = h(T - l_{OE}). \quad (6.20)$$

Срез «кирпича» грунта произойдет, если  $R^0 \leq R^I$ . Максимально возможная касательная сила, действующая на трак гусеничной цепи:

$$R_{\Sigma}^0 = R^0 + F_{OE}^I. \quad (6.21)$$

Срез грунтового «кирпича» произойдет также, когда первичная площадка скольжения выйдет за пределы его верхней грани  $AK$  (см.

рисунок 6.3). В этом случае угол наклона площадки скольжения будет меньше критического угла  $\psi_{KP}^I$ , определяемого геометрическими параметрами трака, т. е.

$$\psi < \psi_{KP}^I = \operatorname{arctg} \left( \frac{h}{T - l_{OE}} \right). \quad (6.22)$$

При  $\psi < \psi_{KP}^I$  удерживающей от разрушения будет являться поверхность  $AT$ , расположенная у задней грани предыдущего грунтозацепа. Поскольку из-за смещения грунтозацепа удерживающим давлением на этой поверхности будет являться давление связности, а также уменьшается угол при вершине откоса (угол  $TAO$  вместо угла  $ABO$  (см. рисунок 6.5)), устойчивость грунта резко уменьшится [66, 67], что приведет к срезу всего «кирпича» грунта. В таком случае сила  $R_{\Sigma}^0$  будет максимально возможной.

Если среза грунта между грунтозацепами при данных нагрузках не происходит, то наступает последующая фаза разрушения грунта.

*Расчет усилий во второй фазе разрушения грунта.* Если внешняя касательная сила становится выше максимально возможной в первой фазе, то наступает вторая фаза разрушения. Во время этой фазы «вытесняется» призма грунта  $OB'K$ . При этом увеличивается давление на площадку скольжения  $OB'$ , и эта площадка переформируется, что приводит к дальнейшему росту объема грунта, находящегося в предельном напряженном состоянии. Этот процесс напоминает «течение» грунта (см. подраздел 1.2). Все заканчивается формированием новой площадки  $OB$ , при которой может произойти срез грунта по плоскости вершин грунтозацепов либо выклинивание траков или дальнейшего разрушения грунта происходить не будет. В последних двух случаях трак не полностью реализует несущую способность грунта.

Равновесие вытесняемой призмы  $OBK$  во второй фазе разрушения необходимо рассматривать непосредственно в момент формирования площадки  $OB$ . В этом случае на вытесняемую призму со стороны опорной поверхности трака действует сила  $P_{BK}$  (рисунок 6.9), нормальная к поверхности  $BK$ , поскольку отсутствует смещение рассматриваемой призмы относительно опорной поверхности трака. Максимальное значение силы  $P_{BK}$  ограничено весом трактора, приходящимся на один трак:

$$P_{BK_{\max}} = \frac{G_{mp}}{2n}, \quad (6.23)$$

где  $G_{mp}$  – вес трактора;

$n$  – количество опорных траков одной гусеницы.

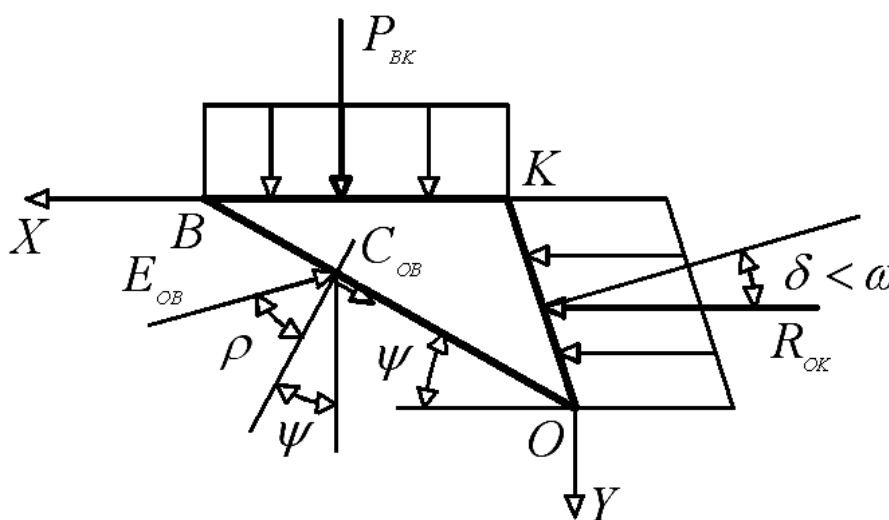


Рисунок 6.9 – Расчетная схема для определения сил, действующих на вытесняемую призму грунта

Со стороны грунта на площадку  $OB$  действует сила  $E_{OB}$ , отклоненная от нормали к этой площадке на угол внутреннего трения  $\rho$ . Сила  $C_{OB}$ , затрачиваемая на преодоление сцепления, определится следующим образом:

$$C_{OB} = \frac{Bch}{\sin \psi}, \quad (6.24)$$

где  $\psi$  – угол наклона площадки скольжения  $OB$ .

Со стороны передней грани грунтозацепа действует сила  $R_{OK}$ , направление и угол  $\delta$  наклона которой зависят от угла наклона передней грани грунтозацепа. Как правило, у гусеничных тракторов этот угол составляет  $5-15^\circ$  относительно вертикали, т. е. находится в пределах  $\frac{\pi}{2} - \omega \leq \alpha \leq \frac{\pi}{2} + \omega$ . Поэтому силу  $R_{OK}$  можно считать действующей в

направлении смещения трака. Минимальное значение этой силы определяется значением  $R_{OK}^I$ .

Уравнения равновесия вытесняемой призмы имеют вид:

$$\left. \begin{aligned} \Sigma X &= R_{OK} - E_{OB} \sin(\rho + \psi) - C_{OB} \cos \psi; \\ \Sigma Y &= R_{BK} - E_{OB} \cos(\rho + \psi) + C_{OB} \sin \psi. \end{aligned} \right\} \quad (6.25)$$

Систему уравнений (6.25) нельзя решить, поскольку она содержит три неизвестные силы. Однако ее можно использовать следующим образом. Силы  $E_{OB}$  и  $P_{BK}$  можно определить для каждого выбранного значения силы  $R_{OK}$ . Такой подход позволит получить решение (6.25) и проследить разрушение грунта под траком при последовательном увеличении силы  $R_{OK}$ . Из первого уравнения (6.25)

$$E_{OB} = \frac{R_{OK} - C_{OB} \cos \psi}{\sin(\rho + \psi)}. \quad (6.26)$$

Во второе уравнение системы (6.25) подставляется (6.26):

$$P_{BK} = (R_{OK} - C_{OB} \cos \psi) \operatorname{ctg}(\rho + \psi) - C_{OB} \sin \psi. \quad (6.27)$$

Для определения угла наклона  $\psi$  площадки скольжения  $OB$  используется аналитический метод расчета этого угла по граничным условиям (см. раздел 1.4).

Приведенное давление  $p$ , действующее на площадку  $AB$ , можно рассчитать в соответствии со схемой на рисунке 6.10 по уравнению

$$p = \sqrt{(p_{AB}^\circ \sin \omega)^2 + (p_{AB}^\circ \cos \omega + H)^2}, \quad (6.28)$$

где  $p_{AB}^\circ$  – действительное давление, действующее на площадку  $AB$  со стороны опорной части трака.

Давление  $p_{AB}^\circ$  можно определить по уравнению (6.1), подставив вместо давления  $p_{1AK}$  давление  $p_{2AB}$ :



$$p_{AB}^{\partial} = \frac{P_{2AB}}{\cos \omega}, \quad (6.29)$$

где  $p_{2AB}$  – нормальное давление, действующее на площадку  $AB$ .

Нормальное давление рассчитывается с учетом перераспределения давлений между поверхностями  $AB$ ,  $BK$  и  $OE$  в результате «вытеснения» призмы  $OBK$  грунта (рисунок 6.11).

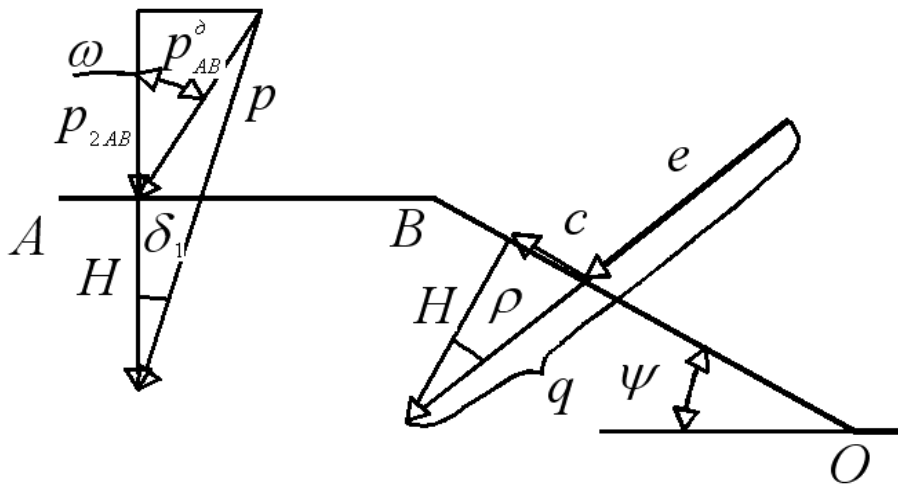


Рисунок 6.10 – Схема давлений, действующих на грунт ненарушенной структуры

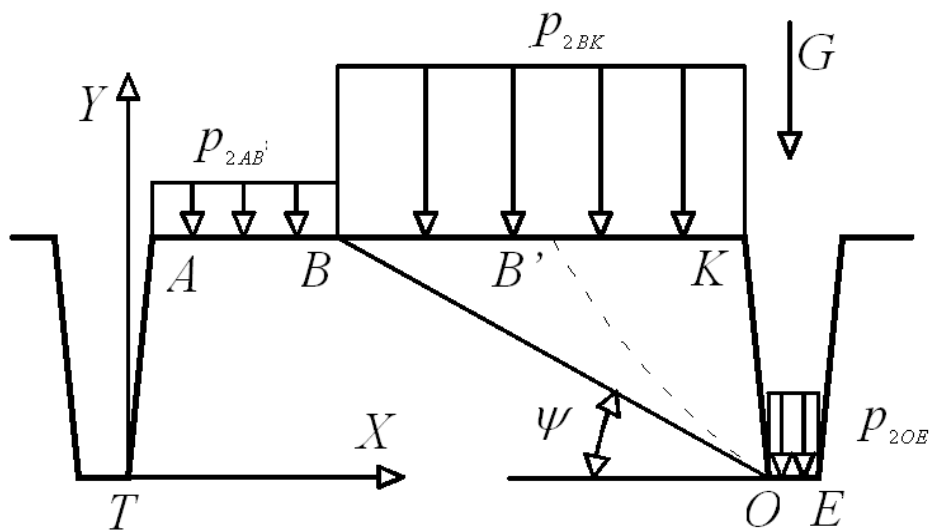


Рисунок 6.11 – Схема перераспределения нормальных давлений при вытеснении призмы грунта  $OBK$

Угол отклонения приведенного давления  $p$  находят из схемы на рисунке 6.10 по уравнению

$$\delta_1 = \arcsin \frac{p_{AB}^{\partial} \sin \omega}{p}.$$

При увеличении внешней касательной силы вытесняемая призма оказывает давление на участок  $BK$  опорной поверхности трака, разгружая от весовых нагрузок как опорную часть трака  $AB$ , так и вершину грунтозацепа  $OE$ .

Далее определяются давления  $p_{2AB}$  и  $p_{2OE}$ , действующие при вытеснении призмы  $OBK$  на участки трака  $AB$  и  $OE$ . Таким образом, уравнение равновесия сил, действующих на трак вдоль оси  $Y$ :

$$p_{2AB} Bl_{AB} + p_{2BK} Bl_{BK} + p_{2OE} Bl_{OE} - G = 0, \quad (6.30)$$

где  $G$  – вес трактора, приходящийся на один трак.

В технической литературе недостаточно рассмотрен вопрос о распределении давлений между опорными частями трака  $AB$  и  $OE$ . В работе считается, что при увеличении давления на опорную часть трака  $BK$  давления, действующие на опорные части  $AB$  и  $OE$ , будут распределяться между собой пропорционально первоначальным значениям. Тогда

$$\frac{p_{1AB}}{p_{2AB}} = \frac{p_{1OE}}{p_{2OE}}. \quad (6.31)$$

Решается система уравнений (6.30) и (6.31):

$$p_{2OE} = \frac{\frac{G}{B} - p_{2BK} l_{BK}}{\frac{p_{1AB}}{p_{1OE}} l_{AB} + l_{OE}}; \quad (6.32)$$

$$p_{2AB} = \frac{p_{1AB} \left( \frac{G}{B} - p_{2BK} l_{BK} \right)}{p_{1AB} l_{AB} + p_{1OE} l_{OE}}. \quad (6.33)$$

С учетом, что первоначальные давления от весовых нагрузок на поверхностях  $AB$  и  $AK$  равны, т. е.  $p_{1AB} = p_{1AK}$ , а давление на участке  $BK$  опорной поверхности трака при вытеснении призмы  $OBK$  будет увеличиваться на  $\Delta p$ , т. е.  $p_{2BK} = p_{1AK} + \Delta p$ , преобразуются (6.32) и (6.33):

$$p_{2OE} = \frac{\frac{G}{B} - (p_{1AK} + \Delta p)l_{BK}}{\frac{p_{1AK}}{p_{1OE}}l_{AB} + l_{OE}}; \quad (6.34)$$

$$p_{2AB} = \frac{p_{1AK} \left( \frac{G}{B} - (p_{1AK} + \Delta p)l_{BK} \right)}{p_{1AK}l_{AB} + p_{1OE}l_{OE}}. \quad (6.35)$$

Если давление  $p_{2BK}$  достигнет значения  $\frac{G}{Bl_{BK}}$ , то весь вес трактора, приходящийся на трак, будет удерживаться только вытесняемой призмой, тем самым полностью разгружая опорную часть трака и вершину грунтозацепа. Давления  $p_{2OE}$  и  $p_{2AB}$  в этом случае будут равны нулю.

Далее определяется приведенное давление, действующее на площадку  $OB$  при ее предельно напряженном состоянии (см. рисунок 6.10). С учетом давления от силы  $E_{OB}$ , действующей со стороны вытесняемой призмы на площадку  $OB$ ,

$$e = \frac{E_{OB} \sin \psi}{Bh}. \quad (6.36)$$

Тогда в соответствии со схемой приведенное давление  $q$  можно найти следующим образом:

$$q = e + \frac{c}{\sin \rho} = \frac{E_{OB} \sin \psi}{Bh} + \frac{c}{\sin \rho}. \quad (6.37)$$

Это уравнение соответствует (2.7).

Для определения значений приведенного давления  $q$  и угла  $\psi$  наклона площадки скольжения для каждого принятого значения силы  $R_{OK}$

необходимо решить систему уравнений, в которую входят уравнения типа  $\psi = f(q)$  (см. (1.23) или (1.27)) и типа  $q = f(\psi)$  (см. (6.37)). Для решения используются итерационные методы вычислений, которые сводятся к следующему. Принимается численное значение угла наклона площадки скольжения  $\psi$ . Для этого значения определяется приведенное давление  $q$  по (6.37). Полученное значение  $q$  сравнивается с вычисленным по (1.23) или (1.27) расчетным значением этого же давления. При их несовпадении подбирается новое значение угла наклона площадки скольжения, и расчеты повторяются до получения результата с требуемой точностью.

Таким образом, для любого заданного значения силы  $R_{OK}$  можно определить остальные параметры взаимодействия грунтозацепа с грунтом во время второй фазы разрушения.

Рассчитывается сила  $R_{\Sigma}''$ , действующая со стороны грунта на трак гусеницы во время второй фазы разрушения. Эта сила будет складываться из полной величины силы  $R''$ , действующей на переднюю грань грунтозацепа с учетом сопротивлений по торцам вытесняемой призмы, и сопротивлений  $F_{OE}''$  и  $F_{AB}''$ , связанных с трением вершины грунтозацепа и опорной части трака о грунт, т. е.

$$R_{\Sigma}'' = R'' + F_{AB}'' + F_{OE}'' . \quad (6.38)$$

Силу  $R''$ , действующую на переднюю грань грунтозацепа во время второй фазы разрушения, можно вычислить из (6.11). Для этого необходимо рассмотреть призму  $OBK$  вместо призмы  $OB'K$ , вместо силы  $R_{OK}'$  подставить в (6.11) силу  $R_{OK}$ , а вместо давления  $q^0$  – давление от силы  $R_{OK}$ , которое можно определить как  $q_R = R_{OK} / Bl_{OK}$ .

В итоге

$$R'' = R_{OK} + 2S_{OBK}(c + \xi q_R \operatorname{tg} \rho) . \quad (6.39)$$

Значение касательной силы, действующей на трак гусеничной цепи, можно рассчитать из (6.12)–(6.14). Для этого входящие в эти уравнения давления  $p_{1AK}$  и  $p_{1OE}$  следует заменить на  $p_{2AB}$  и  $p_{2OE}$  соответственно. Вместо длины площадки  $AK$  (см. рисунок 6.5), равной  $(T - l_{OE})$ , нужно подставлять  $l_{AB}$  – длину площадки  $AB$ . Таким образом, силы трения

опорной части трака и вершины грунтозацепа о неподвижный грунт соответственно рассчитываются по уравнениям:

$$F_{AB}'' = p_{2AB} l_{AB} B \operatorname{tg} \omega; \quad (6.40)$$

$$F_{OE}'' = p_{2OE} l_{OE} B \operatorname{tg} \omega. \quad (6.41)$$

Полученные значения подставляют в (6.38). Тогда значение касательной силы, действующей со стороны грунта на трак гусеницы в целом:

$$R_{\Sigma}'' = R_{OK} + 2S_{OBK} (c + \xi q_R \operatorname{tg} \rho) + B \operatorname{tg} \omega (p_{2AB} l_{AB} + p_{2OE} l_{OE}). \quad (6.42)$$

Таким образом, получены уравнения для определения сил, действующих со стороны грунта на переднюю грань грунтозацепа и на трак гусеничной цепи во время второй фазы разрушения.

*Ограничения на величину внешней касательной силы.* Процесс переформирования площадки скольжения во время второй фазы разрушения грунта может быть ограничен.

Переформирование площадки скольжения приводит к изменению устойчивости призмы  $TABO$  грунта ненарушенной структуры, расположенной между грунтозацепами (рисунок 6.12). Поэтому в ходе расчета параметров, характеризующих разрушение грунта во второй фазе, необходимо проверять устойчивость этой призмы грунта при каждом новом значении внешней касательной силы. Для этого следует определить предельное значение силы, действующей со стороны вытесняемой призмы, при достижении которого устойчивость призмы  $TABO$  нарушится и произойдет ее срез по площадке вершин грунтозацепов.

Проекция сил, действующих на призму грунта ненарушенной структуры  $TABO$ , на оси  $X$  и  $Y$ :

$$\begin{aligned} \Sigma X = C_{OT} + E_{OT} \sin \rho - C_{OB} \cos \psi - E_{OB}'' \sin(\psi + \rho) - \\ - P_{AB} \sin \omega + 2C_{TABO} + 2E_{TABO} \sin \rho = 0; \end{aligned}$$

$$\Sigma Y = E_{OT} \cos \rho + C_{OB} \sin \psi - E_{OB}'' \cos(\psi + \rho) - P_{AB} \cos \omega = 0,$$

где  $E_{OT}$  – сила, действующая на площадку  $OT$  со стороны опорного грунта;

$E_{OB}^n$  – предельная сила, действующая со стороны вытесняемой призмы грунта;

$P_{AB}$  – сила, оказывающая воздействие со стороны опорной поверхности трака;

$C_{TABO}$  – сила сцепления по боковому торцу рассматриваемой призмы грунта,  $C_{TABO} = ch(l_{AB} + T - l_{OE})/2$ ;

$E_{TABO}$  – сила, действующая на боковой торец грунта ненарушенной структуры, полученная с учетом того, что за главное напряжение принято нормальное давление от силы  $E_{OB}^n$ ,

$$E_{TABO} = \frac{E_{OB}^n \sin \psi \xi S_{TABO}}{Bh}. \quad (6.43)$$

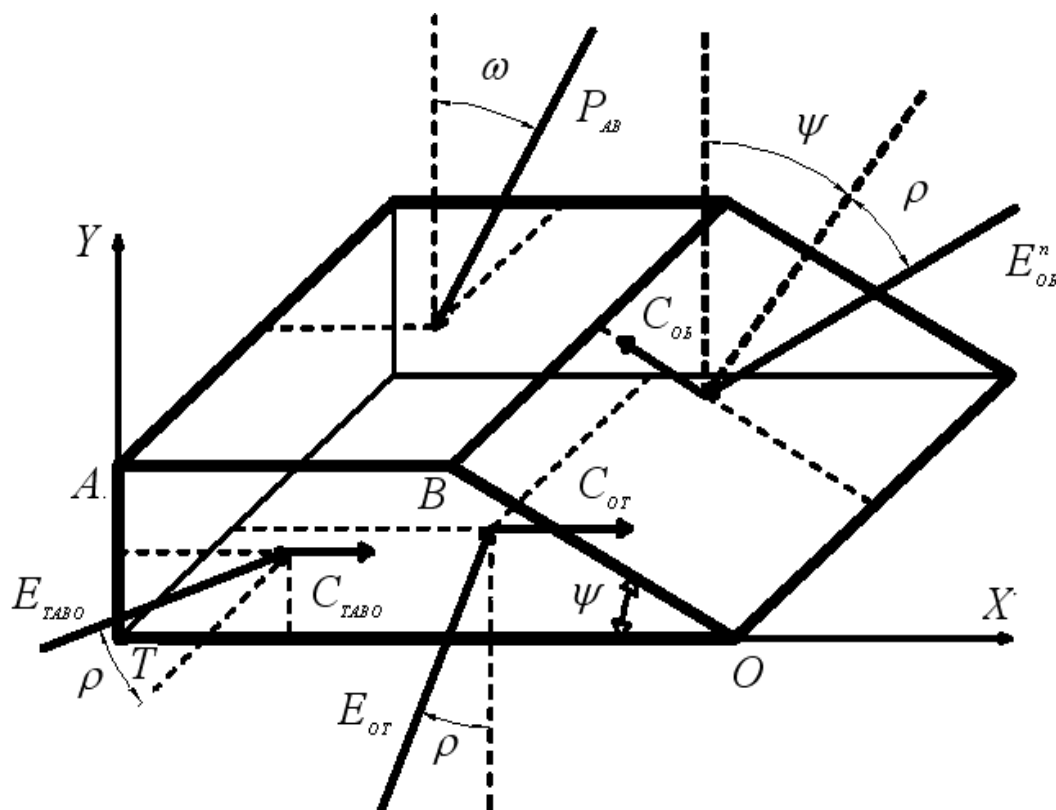


Рисунок 6.12 – Схема сил, действующих на призму грунта ненарушенной структуры, находящуюся между грунтозацепами

Силу  $E_{OT}$  выражают из второго уравнения системы и подставляют это значение в первое уравнение. Тогда

$$C_{OT} + \operatorname{tg} \rho (P_{AB} \cos \omega + E_{OB}^n \cos(\psi + \rho) - C_{OB} \sin \psi) - C_{OB} \cos \psi - \\ - E_{OB}^n \sin(\psi + \rho) - P_{AB} \sin \omega + 2C_{TABO} + 2E_{TABO} \sin \rho = 0.$$

Откуда

$$E_{OB}^n = [C_{OT} + P_{AB} \cos \omega \operatorname{tg} \rho - C_{OB} \operatorname{tg} \rho \sin \psi - C_{OB} \cos \psi - P_{AB} \sin \omega + \\ + 2C_{TABO} + 2E_{TABO} \sin \rho] / [\sin(\psi + \rho) - \operatorname{tg} \rho \cos(\psi + \rho)]. \quad (6.44)$$

Это значение является предельным для силы  $E_{OB}$ , поэтому увеличение внешней касательной силы возможно до тех пор, пока не выполнится условие

$$E_{OB} \geq E_{OB}^n. \quad (6.45)$$

При превышении предельного значения произойдет срез грунта по площадке вершин грунтозацепов.

Кроме устойчивости рассматриваемой призмы, необходимо проверить положение площадки скольжения, т. к. она может выйти за пределы верхней грани «кирпича»  $TAKO$  по мере увеличения внешней касательной силы, и угол ее наклона достигнет критического значения  $\psi_{KP}^I$ . Это приведет к разрушению грунта, находящегося между грунтозацепами. Внешняя касательная сила будет максимальной при критическом значении угла наклона площадки скольжения.

Под действием давления, действующего со стороны опорной поверхности трака, может разрушиться часть грунта  $TAG$ , находящегося у задней грани предыдущего грунтозацепа (рисунок 6.13). Для определения предельного давления используются положения теории пассивного давления грунта на подпорные стенки. В этом случае в качестве подпорной стенки принимается поверхность  $AB$ , а в качестве засыпки – поверхность  $AT$  грунта. Удерживающим давлением на поверхности засыпки будет являться давление связности. Разрушающим будет давление, действующее на поверхность  $AB$ , а угол его отклонения от нормали будет равен углу внешнего трения  $\delta = \omega$ .

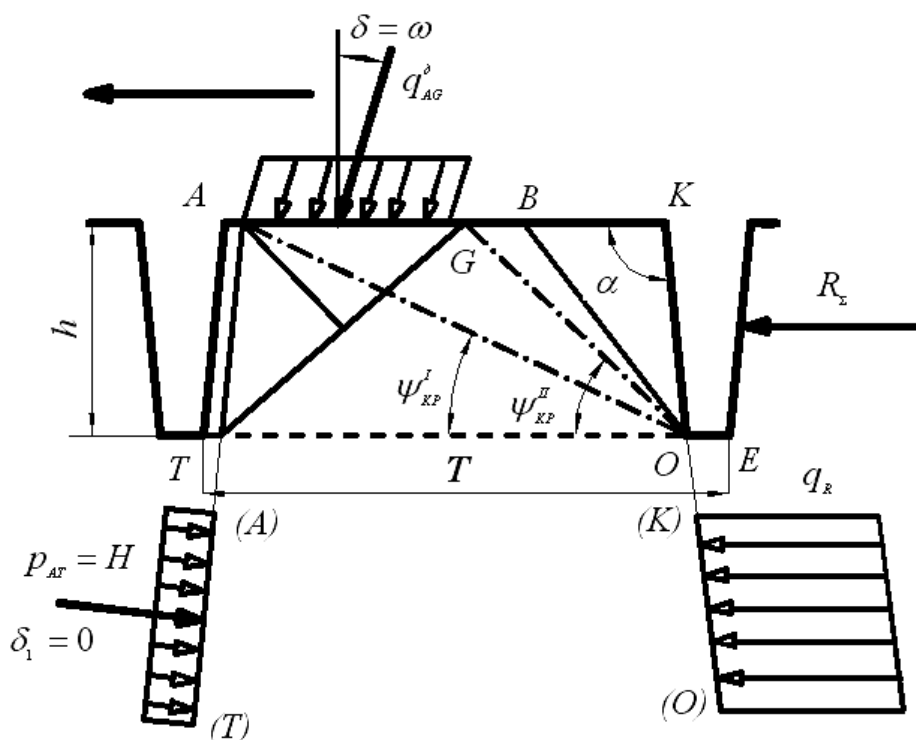


Рисунок 6.13 – Схема к расчету разрушения грунта, расположенного у задней грани предыдущего грунтозацепа

Проверка устойчивости призмы  $TAG$  производится следующим образом. Определяется предельное приведенное давление  $q_{AG}$ , при котором эта призма разрушается. Полученное значение сравнивается с приведенным давлением  $p$ , действующим на площадку  $AB$  со стороны трака. Если давление  $p$  превышает предельное значение, то призма  $TAG$  разрушается. При этом необходим перерасчет устойчивости оставшейся части грунта ненарушенной структуры  $TGBO$  вследствие уменьшения ее размеров.

Если устойчивость призмы  $TGBO$  не нарушена, следует оценить угол наклона площадки скольжения по отношению к новому критическому углу  $\psi_{kp}^{II}$ . Это значение определяется границей разрушения призмы  $TAG$ , и его можно вычислить по уравнению

$$\psi_{kp}^{II} = \arctg \frac{h}{(T - l_{OE} - l_{AG})}, \quad (6.46)$$



где  $l_{AG}$  – длина отрезка  $AG$ , который определяется при известном положении площадки скольжения  $TG$ .

При  $\psi < \psi_{kp}''$  происходит срез грунта по плоскости вершин грунтозацепов по причинам, рассмотренным выше.

Увеличение внешней касательной силы приводит к росту силы  $P_{BK}$ , действующей со стороны вытесняемой призмы грунта на опорную поверхность трака. Когда  $P_{BK}$  достигнет предельного значения  $P_{BKmax}$ , определяемого по (6.23), произойдет выклинивание трака вытесняемой призмой грунта при ее смещении по площадке скольжения  $OB$  (см. рисунок 6.6). В данном случае внешняя касательная сила будет максимальной.

Таким образом, увеличение внешней касательной силы, приложенной к гусеничному движителю, может осуществляться до тех пор, пока не произойдет либо срез грунта, находящегося между грунтозацепами, либо выклинивание траков из грунта.

#### **6.4 Исследования разрушения грунта траком гусеничной цепи**

Теоретические исследования взаимодействия грунтозацепов гусеничных машин с грунтом выполнены применительно к трактору Т-170 с типовыми размерами грунтозацепов: шагом  $T = 0,203$  м, высотой  $H = 0,065$  м. Рассматривался грунт III категории с углом внутреннего трения  $\rho = 28^\circ$  и удельным сцеплением  $c = 60$  кПа. Распределение давлений по грунтозацепам принималось в соответствии с рисунком 6.2.

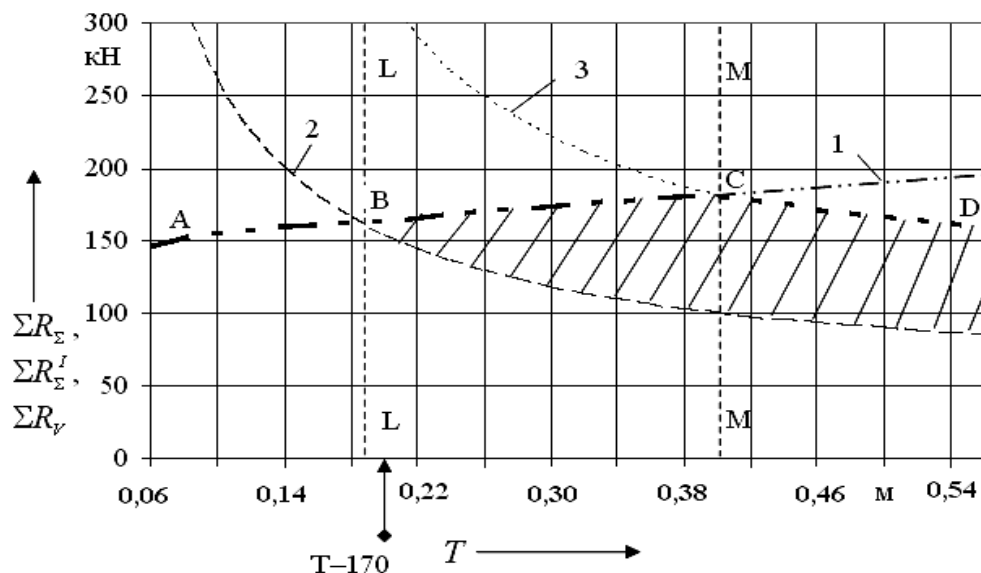
Исследовано и проанализировано влияние шага грунтозацепов на максимальную силу тяги по сцеплению, реализуемую гусеничным движителем (выделенная прерывистая линия на рисунке 6.14, а). Установлено, что в рассматриваемых условиях существуют три диапазона значений шага грунтозацепов, для каждого из которых характерна своя схема разрушения грунта.

При относительно малом шаге (диапазон значений до отрезка  $LL$ ) во время первой фазы происходит срез всего «кирпича» грунта, находящегося под гусеничным траком. Такой вариант является наиболее неблагоприятным.

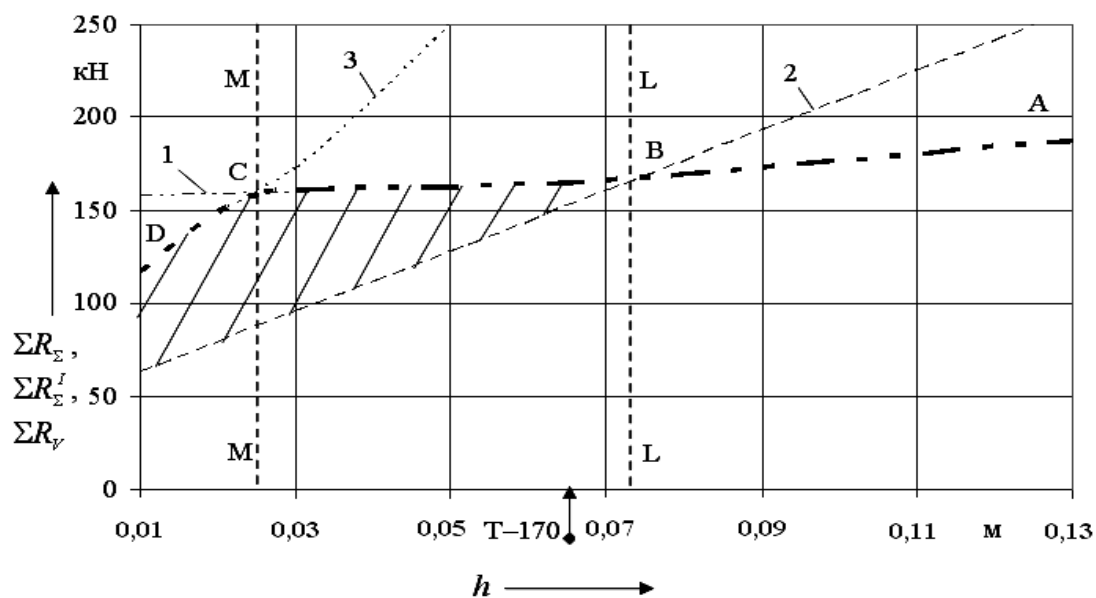
При значениях шага, находящихся в диапазоне от 0,19 до 0,4 м, расположенном между отрезками  $LL$  и  $MM$ , по мере увеличения внешней касательной силы, действующей на трак, происходит переформирование

первичной площадки скольжения до тех пор, пока не произойдет срез оставшейся призмы грунта между грунтозацепами.

а)



б)



1 – касательная сила, необходимая для среза грунта,  $\Sigma R_z$ ; 2 – условная касательная сила  $\Sigma R_z'$ , при которой появляется первичная площадка скольжения; 3 – условная касательная сила  $\Sigma R_v$ , при которой траки выклиниваются из грунта; /// – зона протекания второй фазы

Рисунок 6.14 – Влияние шага (а) и высоты (б) грунтозацепов на силы, характеризующие взаимодействие гусениц с грунтом

При значениях шага свыше 0,4 м (диапазон правее отрезка *ММ*) переформирование площадки скольжения продолжается до выклинивания трака вытесняемой призмой грунта. В данном случае не полностью реализуется несущая способность грунта, поскольку часть грунта между грунтозацепами остается неразрушенной.

Таким образом, при увеличении шага грунтозацепов максимальная сила тяги по сцеплению гусеничного движителя будет увеличиваться до определенного значения.

Исследовано влияние высоты грунтозацепов на максимальную силу тяги по сцеплению при их полном погружении в грунт (выделенная линия на рисунке 6.14, б).

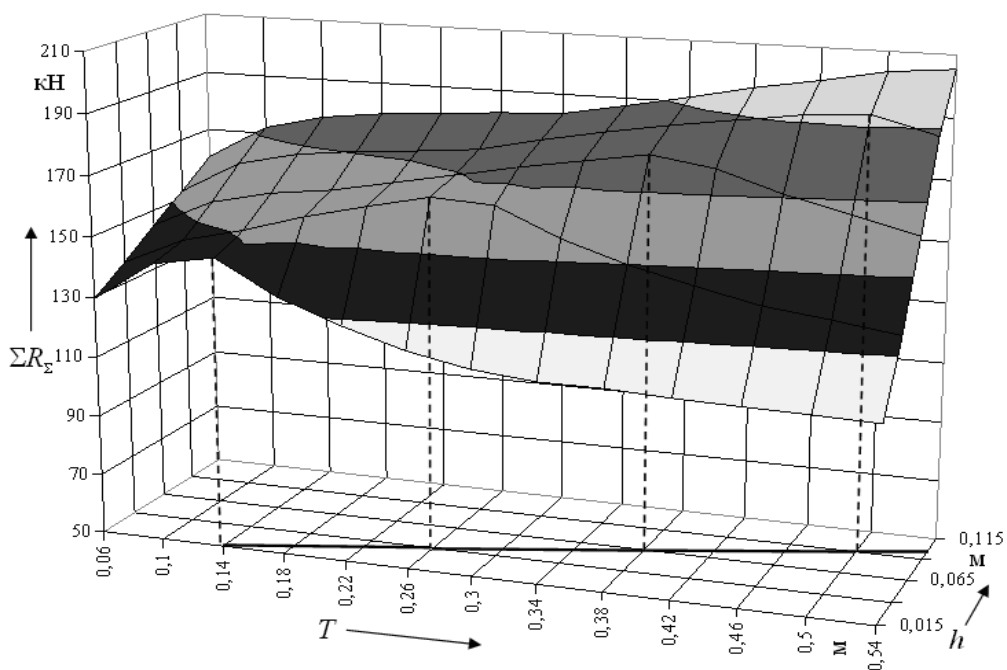
При малых значениях высоты (диапазон до отрезка *ММ*) происходит выклинивание трака на вытесняемой призме грунта. В этом случае шаг оказывается относительно большим, вследствие чего часть грунта между грунтозацепами остается неразрушенной и его несущая способность полностью не реализуется.

При значениях высоты грунтозацепов в диапазоне от 0,022 до 0,072 м (между отрезками *LL* и *ММ*) происходит переформирование первичной площадки скольжения. Предельная зона грунта, примыкающая к грунтозацепу, увеличивается до тех пор, пока не срежется оставшаяся часть грунта.

При значениях высоты грунтозацепов свыше 0,072 м (диапазон правее отрезка *LL*) происходит срез всего «кирпича» грунта, находящегося под гусеничным траком во время первой фазы разрушения. Данная схема разрушения аналогична схеме при малых значениях шага грунтозацепов.

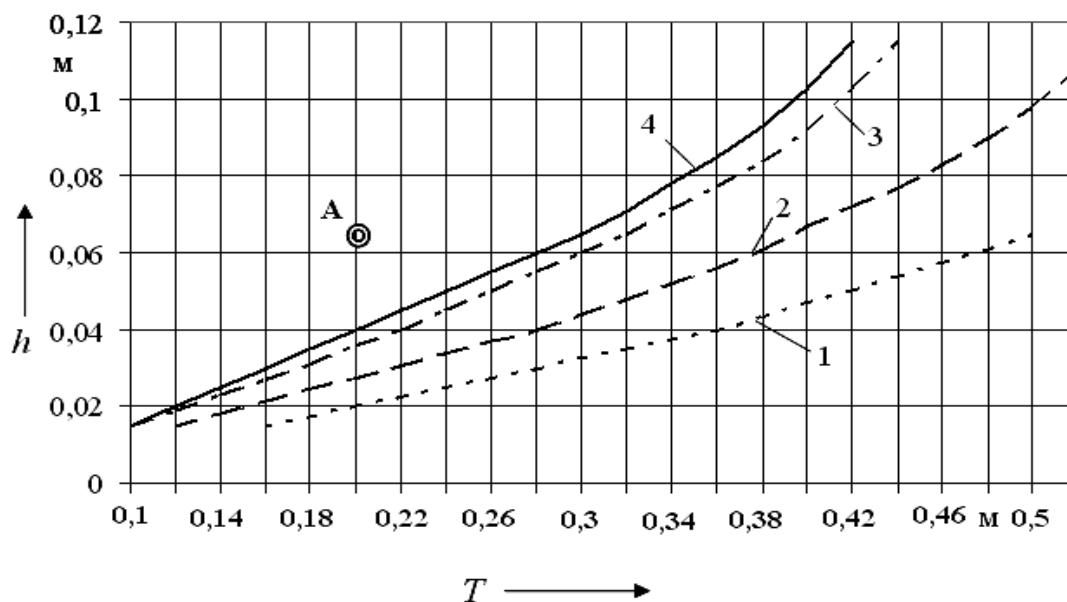
Таким образом, максимальная сила тяги, реализуемая движителем, интенсивно увеличивается с ростом высоты грунтозацепов до определенного значения (0,022 м), соответствующего границе между первым и вторым диапазоном (отрезок *ММ*). При дальнейшем увеличении высоты сила тяги изменяется только за счет увеличения площадей боковых торцов грунта.

Аналитические исследования позволили установить рациональные соотношения между шагом и высотой грунтозацепов, при которых реализуемая траками сила тяги будет максимальной. Это соотношение для рассматриваемых выше условий изображено на рисунке 6.15 линией, расположенной в горизонтальной координатной плоскости, а для грунтов с различными физико-механическими свойствами – на рисунке 6.16.



— — линия рационального соотношения между шагом и высотой грунтозацепов

Рисунок 6.15 – Влияние шага и высоты грунтозацепов на силу тяги по сцеплению



1 –  $c = 45$  кПа; 2 –  $c = 60$  кПа; 3 –  $c = 90$  кПа; 4 –  $c = 105$  кПа; А – параметры грунтозацепов типовой конструкции движителя трактора Т-170

Рисунок 6.16 – Рациональные соотношения между высотой и шагом грунтозацепов для разных грунтовых условий

Анализ влияния угла наклона грунтозацепов на силу тяги по сцеплению показал, что в диапазоне от 70 до 110° его влияние незначительно.

Проведенные исследования позволили выявить и установить рациональные соотношения между шагом и высотой грунтозацепов, обеспечивающие максимальную величину силы тяги, реализуемой траком. Выявлены взаимосвязи между этими параметрами и схемами разрушения грунта.

Для подтверждения результатов, полученных предлагаемым методом, проведены исследования взаимодействия грунтозацепов гусеничного движителя с грунтом. Использовался грунтовый канал, в котором устанавливалось тяговое устройство с динамометром, служащее для перемещения модели траков гусеничного движителя. Для визуального исследования процессов, протекающих в грунте, вдоль боковой стороны модели траков устанавливалась стеклянная стенка. Модель траков позволяла изменять шаг грунтозацепов до 150 мм, а значение высоты выбирать из ряда 13; 20,5; 26 мм. Модель имитировала часть гусеничной цепи движителя трактора Т-170 в масштабе 1:5.

При проведении экспериментов динамометром измерялась касательная сила сопротивления, действующая со стороны грунта на модель траков при различных сочетаниях значений шага, высоты и угла наклона грунтозацепов.

Для каждого эксперимента осуществлялся расчет параметров на ПЭВМ.

Сходимость результатов экспериментальных и расчетных значений касательной силы сопротивления грунта при варьировании параметров грунтозацепов в исследуемых диапазонах находится в пределах от 3 до 9 %, что подтверждает адекватность результатов, полученных разработанным методом, экспериментальным данным.

Покадровый просмотр видеозаписей на компьютере позволил подтвердить варианты разрушения грунта, рассмотренные выше, и их соответствие условиям нагружения трака (рисунок 6.17). К вариантам разрушения грунта относятся срез грунта по плоскости вершин грунтозацепов (см. рисунок 6.17, а), выклинивание траков из грунта (см. рисунок 6.17, б), образование вытесняемой призмы грунта с последующим срезом грунта ненарушенной структуры (см. рисунок 6.17, в), отделение

призмы грунта, находящейся у задней грани предыдущего грунтозацепа (см. рисунок 6.17, г).

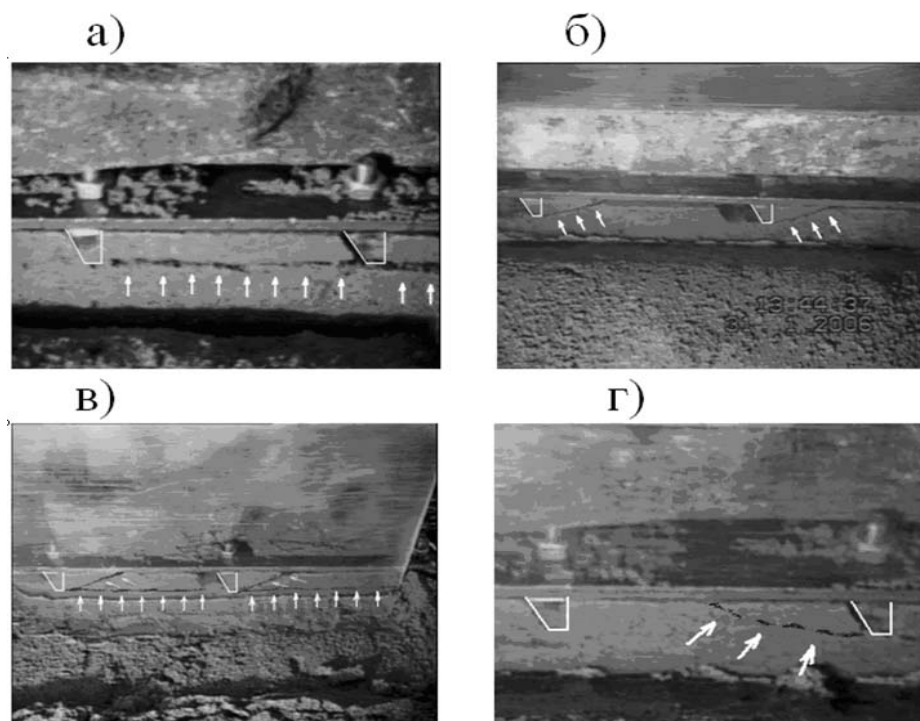


Рисунок 6.17 – Разрушение грунта грунтозацепами

Таким образом, подтверждены теоретические положения о многовариантном процессе разрушения грунта, находящегося между грунтозацепами гусеничного движителя.

Приведенный метод расчета пригоден для промышленных тракторов, работающих на низких скоростях. Как установил М. Г. Беккер [69], скорости сдвига 0,9–9 км/ч (такие скорости сдвига трака относительно опорной поверхности при буксовании  $\delta \leq 10\%$  соответствуют скоростям движения трактора, значительно превышающим рабочие скорости промышленных тракторов) не влияют на тягово-сцепные качества машины. Это подтверждается и опытами по резанию почв и грунтов [3, 4, 65].

## **Выводы**

На основе закономерностей теории предельного состояния грунтовых масс и положений, используемых в теории резания грунта, разработан метод анализа взаимодействия грунта с траком гусеничного движителя, учитывающий многофазность и альтернативные варианты разрушения грунта.

Предложенный метод анализа, основные положения которого подтверждены экспериментальными исследованиями физических процессов разрушения грунта грунтозацепами, позволил научно обосновать:

- существование двух фаз разрушения грунта грунтозацепами;
- условия появления первичной площадки скольжения и ее переформирования во второй фазе;
- альтернативные варианты разрушения грунта траком:
  - а) срез грунта грунтозацепами на ранней стадии взаимодействия;
  - б) срез грунта после образования перед грунтозацепом вытесняемой призмы;
  - в) срез грунта при наклоне площадки скольжения до критических значений;
  - г) выклинивание трака из грунта на вытесняемой призме;
  - д) разрушение грунта у задней грани предыдущего грунтозацепа;
  - е) наиболее полное использование несущей способности грунта при его срезе во время второй фазы разрушения в условиях, близких к условиям выклинивания трака.

Получены рациональные соотношения между шагом и высотой, обеспечивающие наилучшие тягово-сцепные качества гусеничной машины при ее работе на грунте различных категорий. Применительно к трактору Т-170 увеличение шага грунтозацепов до значений 390–410 мм позволяет увеличить силу тяги по сцеплению на 9–11 %; уменьшение высоты грунтозацепов до значений 22–24 мм не оказывает существенного влияния на силу тяги по сцеплению.

## Список литературы

- 1 **Горячкин, В. П.** Собрание сочинений / В. П. Горячкин. – 2-е изд. – М. : Колос, 1968. – Т. 2. – 455 с.
- 2 **Зеленин, А. Н.** Основы разрушения грунтов механическими способами / А. Н. Зеленин. – М. : Машиностроение, 1968. – 376 с.
- 3 **Ветров, Ю. А.** Резание грунтов землеройными машинами / Ю. А. Ветров. – М. : Машиностроение, 1971. – 360 с.
- 4 **Артемьев, К. А.** Теория резания грунтов землеройными машинами : учеб. пособие / К. А. Артемьев. – Новосибирск : НИСИ, 1978. – 52 с.
- 5 **Garbotz, G.** Untersuchungen über das Kraftspiel in Flachbagger-Schneidwerkzeugen in Mittelsand und schwach bindigem, sandigem Schluff unter besonderer Berücksichtigung der Planierschilde und ebenen Schurfkubelschneiden / G. Garbotz, G. Drees // Forschungsberichte des Wirtschafts- und Verkehrsministeriums Nordrhein-Westfalen. – Köln : Opladen, 1958. – № 430. – S. 156.
- 6 **Холодов, А. М.** Теоретическое выражение сопротивления грунта лобовому резанию широким плоским ножом / А. М. Холодов // Горные, строительные и дорожные машины : Респ. межведомств. науч.-техн. сб. – Киев : Техника, 1965. – № 1. – С. 5–13.
- 7 **Руднев, В. К.** Копание грунтов землеройно-транспортными машинами активного действия / В. К. Руднев. – Харьков : Вища шк., 1974. – 143 с.
- 8 **Зворыкин, И. А.** Работа и усилие, необходимые для отделения металлических стружек / И. А. Зворыкин. – М. : Русская типолитография, 1893. – 76 с.
- 9 **Айзеншток, И. Я.** К построению физической теории резания грунтов / И. Я. Айзеншток // Резание грунтов. – М. : АН СССР, 1951. – С. 76–103.
- 10 **Sohne, W.** Einige Grundlagen für eine Landtechnische Boden Mechanick / W. Sohne // Grundlagen der Landtechnick. – 1956. – № 7. – S. 11.
- 11 **Brach, I.** Über Probleme von Widerstanden beim Schneiden von Boden / I. Brach // Wissenschaftliche Zeitschrift der Technischen Universität Dresden. – 1963. – № 5. – S. 1283–1289.
- 12 **Абезгауз, В. Д.** Режущие органы машин фрезерного типа для разработки горных пород и грунтов / В. Д. Абезгауз. – М. : Машиностроение, 1965. – 280 с.



13 **Гальперин, М. И.** Механика резания известняков / М. И. Гальперин. – М. : ВИНТИ АН СССР, 1937. – 42 с.

14 **Федоров, Д. И.** Рабочие органы землеройных машин / Д. И. Федоров. – М. : Машиностроение, 1971. – 216 с.

15 **Dinglinder, E.** Über dem Grabewiderstand / E. Dinglinder // Fordertechnik. – 1929. – № 22. – S. 12–24.

16 **Rathje, I.** Der Schnittvorgang im Sände / I. Rathje // VDJ-Forschungsheft. – Berlin, 1931. – S. 350.

17 **Соколовский, В. В.** Статика сыпучей среды / В. В. Соколовский. – М. : Физматгиз, 1960. – 243 с.

18 **Артемьев, К. А.** Основы теории копания грунта скреперами / К. А. Артемьев. – М. ; Свердловск : Машгиз, 1963. – 128 с.

19 **Баловнев, В. И.** Новые методы расчета сопротивлений резанию грунтов / В. И. Баловнев. – М. : Росвузиздат, 1963. – 95 с.

20 **Иванищев, Н. Г.** Определение направления скола грунта в процессе резания / Н. Г. Иванищев // Механизация, оборудование и организация строительства : тр. Воронеж. инж.-строит. ин-та. – Воронеж : Воронеж. ун-т, 1968. – Т. 14. – С. 19–22.

21 **Щемелев, А. М.** Исследование влияния параметров передней заслонки на процесс работы скрепера (на примере скреперов с ковшами емкостью 8–10 м<sup>3</sup>) : дис. ... канд. техн. наук : 05.05.04 : защищена 20.10.71 : утв. 26.11.71 / А. М. Щемелев. – Омск, 1971. – 156 с.

22 **Баловнев, В. И.** Моделирование процессов взаимодействия со средой рабочих органов дорожно-строительных машин / В. И. Баловнев. – М. : Высш. шк., 1981. – 336 с.

23 **Tyro, G.** Probleme des Schnittvorganges bei Erdbewegungsmaschinen insbesondere bei Flachbaggern / G. Tyro, G. Vogel // In Buch : Wissenschaftliche Zeitschrift der Technischen Hochschule Otto von Guericke. – 1969. – № 13, heft 7. – S. 715–724.

24 **Щемелев, А. М.** Аналитическое определение угла скола стружки грунта / А. М. Щемелев, Е. И. Берестов // Исследование и испытание дорожных и строительных машин : сб. тр. – Омск, 1980. – С. 68–78.

25 **Берестов, Е. И.** Сопротивление грунтов резанию / Е. И. Берестов // Изв. вузов. – 1997. – № 10. – С. 102–107.

26 **Зеленин, А. Н.** Физические основы теории резания грунтов / А. Н. Зеленин. – М. ; Л. : АН СССР, 1950. – 354 с.

27 **Крупко, В. А.** Напряженное состояние грунта перед лобовой гранью ножа / В. А. Крупко // Горные, строительные и дорожные машины. – 1984. – Вып. 37. – С. 78–84.

28 **Берестов, Е. И.** Сопротивление грунтов резанию : монография / Е. И. Берестов, А. П. Смоляр. – Могилев : Белорус.-Рос. ун-т, 2008. – 179 с.

29 **Ветров, Ю. А.** Закономерности энергоемкости резания грунтов / Ю. А. Ветров, Ю. П. Пристайло // Горные, строительные и дорожные машины. – 1979. – Вып. 27. – С. 3–9.

30 **Берестов, Е. И.** Экспериментальные исследования процесса отделения стружки при резании грунта / Е. И. Берестов, А. В. Кулабухов // Интерстроймех-2007 : материалы Междунар. науч.-техн. конф. – Самара : СГАСУ, 2007. – С. 87–89.

31 **Христианович, С. А.** Плоская задача математической теории пластичности при внешних силах, заданных на замкнутом контуре / С. А. Христианович // Математ. сб. – 1938. – Т. 1 (43), вып. 4. – С. 238–243.

32 **Домбровский, Н. Г.** Экскаваторы / Н. Г. Домбровский. – М. : Машиностроение, 1969. – 320 с.

33 **Wisner, R. D.** Rate Effects in Soil Cuttings / R. D. Wisner, H. J. Luth // Journal of Terramechanics. – 1972. – Vol. 8, № 3. – S. 11.

34 **Vornkahl, W.** Dynamik gezogener Bodenwerkzeuge im Modellversuch / W. Vornkahl. – Stuttgart : Institut für Landtechnik der Universität, 1966. – 118 s.

35 **Голованов, Ю. В.** Обзор современного состояния механики быстрых движений гранулированных материалов. Механика гранулированных сред. Теория быстрых движений / Ю. В. Голованов, И. В. Ширко. – М. : Мир, 1985. – 280 с.

36 **Баладинский, В. Л.** Динамическое разрушение грунтов / В. Л. Баладинский. – Киев : Вища шк., 1971. – 293 с.

37 **Покровский, Г. И.** Исследования по физике грунтов / Г. И. Покровский. – Л. : Стройиздат, 1937. – 136 с.

38 **Щемелев, А. М.** Стенд для исследования процессов копания грунта землеройными машинами / А. М. Щемелев, Е. И. Берестов // Строительные и дорожные машины. – 1987. – № 9. – С. 6–7.

39 **Баловнев, В. И.** Методы физического моделирования рабочих процессов дорожно-строительных машин / В. И. Баловнев. – М. : Машиностроение, 1974. – 232 с.

40 **Баловнев, В. И.** Физическое моделирование резания грунтов / В. И. Баловнев. – М. : Машиностроение, 1969. – 159 с.

41 **Гарбузов, З. Е.** К определению нагрузок, действующих на ножевые системы землеройных стругов / З. Е. Гарбузов // Тр. Ленингр. фил. ВНИИСтройдормаша. – Л., 1957. – Вып. 1. – С. 46–51.

42 **Недорезов, И. А.** О рациональном профиле отвала автогрейдера и бульдозера / И. А. Недорезов // Строительное и дорожное машиностроение. – 1967. – № 8. – С. 18–20.

43 **Недорезов, И. А.** Исследование косо́го резания грунтов / И. А. Недорезов // Машины для земляных работ. – 1969. – Вып. 77. – С. 28–35.

44 **Недорезов, И. А.** К методике определения основных параметров отвала и тягового расчета автогрейдеров / И. А. Недорезов // Строительные и дорожные машины. – 1962. – № 1. – С. 7–10.

45 **Недорезов, И. А.** Резание и ударное разрушение грунтов / И. А. Недорезов. – М. : Наука, 1965. – 127 с.

46 **Зеленин, А. Н.** Косое резание и копанье грунта / А. Н. Зеленин, А. В. Красильников // Строительные и дорожные машины. – 1967. – № 4. – С. 23–24.

47 **Берестов, Е. И.** Аналитическая модель косо́го резания грунта / Е. И. Берестов, А. П. Стригоцкая // Строительные и дорожные машины. – 2003. – № 4. – С. 42–46.

48 **Берестов, Е. И.** Теоретические основы расчета сопротивлений при косом резании грунта / Е. И. Берестов, А. П. Стригоцкая // Изв. вузов. – 2003. – № 4. – С. 101–107.

49 **Ветров, Ю. А.** Сопротивление грунтов резанию / Ю. А. Ветров. – Киев : Киев. ун-т, 1962. – 78 с.

50 Влияние трения грунта на поверхности ножа на сопротивление резанию / Е. И. Берестов [и др.] // Строительные и дорожные машины. – 2010. – № 11. – С. 34–38.

51 **Густов, Ю. И.** Триботехника строительных машин и оборудования / Ю. И. Густов. – М. : МГСУ, 2011. – 190 с.

52 **Соболевский, Ю. А.** Механика грунтов / Ю. А. Соболевский. – Минск : Выш. шк., 1986. – 176 с.

53 **Терцаги, К.** Теория механики грунтов / К. Терцаги. – М. : Стройиздат, 1961. – 508 с.

54 **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. конф. – Могилев : Белорус.-Рос. ун-т, 2011. – С. 26–29.

55 Справочник конструктора дорожных машин / Под ред. И. П. Бородачева. – М. : Машиностроение, 1973. – 502 с.

56 **Цытович, Н. А.** Механика грунтов (краткий курс) / Н. А. Цытович. – М. : Высш. шк., 1973. – 280 с.

57 **Берестов, Е. И.** Методика расчета параметров, характеризующих копание грунта отвалом / Е. И. Берестов, С. В. Ивлев, С. И. Бондарь-Ляшук // Изв. вузов. – 2004. – № 8. – С. 124–131.

58 **Ксенович, И. П.** Ходовая система–почва–урожай / И. П. Ксенович, В. А. Скотников, М. И. Ляско ; под ред. И. П. Ксеновича. – М. : Агропромиздат, 1985. – 304 с.

59 **Гуськов, В. В.** Тракторы : в 2 ч. / В. В. Гуськов. – Минск : Выш. шк., 1977. – Ч. 2. – 384 с.

60 **Забавников, Н. А.** Основы теории транспортных гусеничных машин / Н. А. Забавников. – М. : Машиностроение, 1975. – 448 с.

61 **Львов, Е. Д.** Теория трактора / Е. Д. Львов. – М. : Машгиз, 1960. – 252 с.

62 **Чудаков, Д. А.** Основы теории и расчета трактора и автомобиля / Д. А. Чудаков. – 2-е изд., перераб. и доп. – М. : Колос, 1972. – 384 с.

63 **Скотников, В. А.** Проходимость машин / В. А. Скотников, А. В. Пономарев, А. В. Климанов. – Минск : Наука и техника, 1982. – 328 с.

64 **Софиян, А. П.** Об удельном давлении гусеничного движителя / А. П. Софиян, Е. И. Максименко // Тракторы и сельхозмашины. – 1962. – № 7. – С. 13–15.

65 **Бабков, В. Ф.** Основы грунтоведения и механики грунтов : учеб. пособие / В. Ф. Бабков, В. М. Безрук. – 2-е изд., перераб. и доп. – М. : Высш. шк., 1986. – 239 с.

66 **Берестов, Е. И.** Пассивное давление грунта на ломаные подпорные стенки (Ч. 1) / Е. И. Берестов // Вес. АН Беларусі. Сер. фіз.-тэхн. навук. – 1996. – № 1. – С. 47–54.

67 **Берестов, Е. И.** Пассивное давление грунта на ломаные подпорные стенки (Ч. 2) / Е. И. Берестов // Вес. АН Беларусі. Сер. фіз.-тэхн. навук. – 1997. – № 2. – С. 60–71.

68 **Берестов, Е. И.** Экспериментальные исследования по разрушению грунта подпорной стенкой / Е. И. Берестов, А. В. Кулабухов // Строительная наука и техника. – 2010. – № 1–2. – С. 126–130.

69 **Беккер, М. Г.** Введение в теорию систем местность–машина / М. Г. Беккер. – М. : Машиностроение, 1973. – 520 с.

## Приложение А (справочное)

Таблица А.1 – Численные значения коэффициента  $C_0$ , соответствующие давлению испытательного основания на грунт  $p_0 = 0,02$  МПа

Тип грунта	$C_0$ , Н/см <sup>3</sup>
Глины и суглинки текучепластичные (показатель консистенции $I_T = B > 0,75$ )	6–7
Глины и суглинки мягкопластичные ( $0,5 < I_T < 0,75$ )	8
Глины и суглинки тугопластичные ( $0,25 < I_T < 0,5$ )	20
Глины и суглинки твердые ( $I_T = B < 0$ )	30
Супеси пластичные ( $0,5 < I_T < 1$ )	10
Супеси пластичные ( $0 < I_T < 0,5$ )	16
Супеси твердые ( $I_T < 0$ )	22
Пески водонасыщенные рыхлые ( $\varepsilon > 0,80$ )	12
Пески пылеватые средней плотности ( $\varepsilon \leq 0,80$ )	14
Пески (независимо от влажности и плотности)	18
Гравий, галька, щебень	26

## Оглавление

<b>Введение</b> .....	3
<b>1 Физические основы разрушения грунта</b> .....	4
1.1 Краткий исторический обзор.....	4
1.2 Обоснование механизма разрушения грунта.....	8
1.3 Плоское предельное равновесие сыпучей среды.....	13
1.4 Расчет угла сдвига.....	19
<b>2 Сопротивление грунта резанию плоским рабочим органом</b> .....	31
2.1 Сопротивление грунта резанию при отсутствии призмы волочения.....	31
2.2 Сопротивление грунта резанию при наличии призмы волочения.....	40
2.3 Исследование взаимодействия плоского рабочего органа с грунтом.....	45
<b>3 Сопротивление грунта резанию рабочим органом, повернутым под углом в плане (косое резание)</b> .....	61
3.1 Общие сведения.....	61
3.2 Особенности косого резания грунта.....	62
3.3 Определение сопротивлений при косом резании грунта .....	70
3.4 Исследования влияния поворота ножа на резание грунта.....	79
<b>4 Резание грунта плоским рабочим органом с антифрикционным слоем</b> .....	91
4.1 Общие сведения.....	91
4.2 Метод расчета процесса резания грунта ножом с антифрикционным покрытием.....	92
4.3 Исследование взаимодействия грунта и плоского рабочего органа с антифрикционным слоем.....	101
<b>5 Сопротивление заглублению рабочего органа землеройно-транспортных машин</b> .....	111
5.1 Общие сведения.....	111
5.2 Заглубление рабочего органа при непередельных давлениях на грунт.....	114
5.3 Заглубление рабочего органа при предельных давлениях на грунт.....	119

5.4 Исследования заглабления отвала бульдозера.....	135
<b>6 Сопротивление грунта разрушению грунтозацепами траков гусеничных машин.....</b>	<b>144</b>
6.1 Общие сведения.....	144
6.2 Обоснование расчетной схемы.....	145
6.3 Расчет касательной силы тяги.....	150
6.4 Исследования разрушения грунта траком гусеничной цепи.....	169
<b>Список литературы.....</b>	<b>176</b>
<b>Приложение А.....</b>	<b>181</b>

Научное издание

**Берестов** Евгений Иванович  
**Кулабухов** Артем Владимирович  
**Смоляр** Алла Петровна  
**Афхами Алишах** Алиасгар Хассан  
**Джалилванд** Эхсан Хоррам

**ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ РАБОЧЕГО  
ОБОРУДОВАНИЯ И ГУСЕНИЧНЫХ ТРАКОВ  
ЗЕМЛЕРОЙНЫХ МАШИН  
С ГРУНТОМ**

Редактор Т. А. Рыжикова

Художественное оформление обложки Е. С. Фитцова

Технический редактор А. А. Подошевка

Компьютерный дизайн Н. П. Полевничая

Подписано в печать 18.11.2013. Формат 60×84/16. Бумага офсетная. Гарнитура Таймс.  
Печать трафаретная. Усл.-печ. л. 10,92. Уч.-изд. л. 11,0. Тираж 100 экз. Заказ № 812.

Издатель и полиграфическое исполнение  
Государственное учреждение высшего профессионального образования  
«Белорусско-Российский университет»  
ЛИ № 02330/0548519 от 16.06.2009.  
Пр. Мира, 43, 212000, Могилев.