СТРОИТЕЛЬСТВО. АРХИТЕКТУРА

УДК 621.828.6

Е. И. Берестов, д-р техн. наук, проф., Р. И. Кутынко

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ РЕЗАНИЯ ГРУНТА

Приведено описание экспериментальных установок для исследования резания грунта. Рассмотрены особенности резания вертикальных массивов грунтов и приведены зависимости для расчета геометрических и силовых параметров резания вертикальных стенок.

Введение

Резание является одним из наиболее распространенных видов разработки грунта. По такому принципу работают многие виды землеройных машин. К ним относятся: фрезерные, щелерезные машины, траншеекопатели со скребковыми рабочими органами, рабочие органы машин для подземной разработки полезных ископаемых, многие виды сельскохозяйственной техники и т. д. Резание является составной частью рабочих процессов таких распространенных машин, как скреперы, автогрейдеры, бульдозеры, экскаваторы.

Несмотря на длительную историю развития землеройной техники, на современном этапе продолжается совершенствование их рабочего оборудования с целью снижения энергоемкости самого процесса разработки грунтов, соответственно повышаются требования и к совершенствованию теории их рабочих процессов. В первую очередь, это обусловлено относительно высокими затратами энергии на этот вид работ при отсутствии тенденций к их снижению. Поэтому необходимость дальнейшего изучения процесса резания грунта с целью создания экономичных рабочих органов является важным и актуальным направлением исследований в этой области.

В условиях интенсивного развития вычислительной техники, позволяющей осуществлять сложные вычисления, о которых еще не так давно можно было только мечтать, экспериментальные исследования не утратили своей важности. Только с их помощью можно всесторонне рассмотреть характер разрушения грунта, получить необходимые численные значения исследуемых параметров, подтвердить или опровергнуть результаты теоретических исследований и сами теоретические положения.

Экспериментальные исследования

Экспериментальные исследования проводились в грунтовом канале кафедры «Строительные, дорожные, подъемно-транспортные машины и оборудование» и на установке Ю. А. Ветрова.

Грунтовый канал состоит из ванны с песком, тензометрической тележки, на которой устанавливается исследуемый рабочий орган, тяговой станции и измерительной тензометрической аппаратуры. Основным элементом грунтового канала является тензометрическая тележка, общий вид которой изображен на рис. 1.

Тензометрическая тележка имеет основную 1 и тензометрическую 2 рамы. На тензометрической раме 2 устанавливается модель исследуемого рабочего органа 3. Основная рама 1 имеет колеса 4 и перемещается по направляющим 5. Электродвигатель 6 и редук-

Электронная библиотека Белорусско-Российского университета

тор 7 служат для установки тензометрической рамы 2 на требуемую высоту. Тензометрическая рама 2 установлена на тензобалочках 8 и 9, расположенных в передней и задней частях основной рамы. При помощи этих тензобалочек замеряется нормальная составляющая сопротивления резанию. Касательная составляющая замеряется при помощи тензобалочки 10.

Экспериментальная установка является универсальной, так как с ее помощью можно исследовать все виды резания грунта. Это достигается за счет установки рабочего органа на специальную стойку, на которой наклеены тензодатчики 11 для замера боковой составляющей сопротивления резанию.

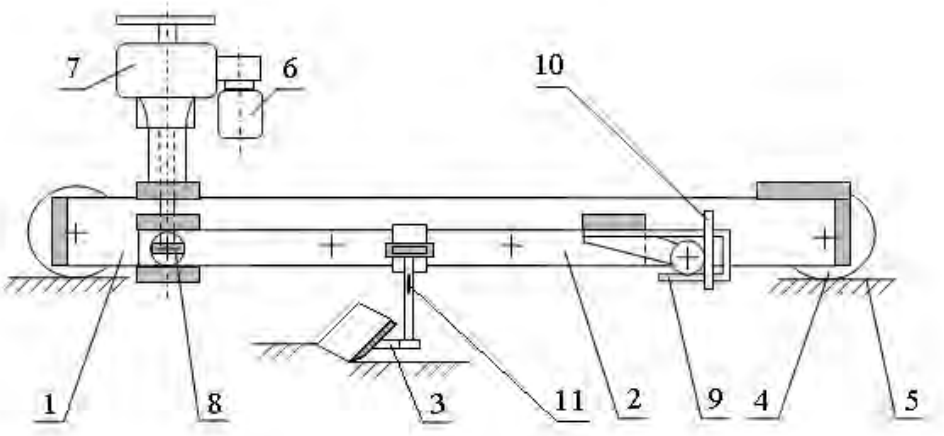

Рис. 1. Тензометрическая тележка

Установка позволяет записывать на осциллограмму следующие параметры процесса резания:

– касательную составляющую сопротивления резанию;

– нормальную составляющую сопротивления резанию;

– боковую составляющую сопротивления резанию;

– отметки времени в миллисекундах.

Для изучения физической природы сдвигов и фиксации с помощью видеокамеры процесса разрушения грунта проводились дополнительные исследования на установке Ю. А. Ветрова, у которой одна из боковых стенок была выполнена из стекла. Такие визуальные исследования позволяют в полной мере увидеть картину разрушения грунта, наглядно изучить особенности взаимодействие ножа с грунтом и характер перемещения грунта по ножу при различных видах резания.

При проведении эксперимента процесс резания грунта фиксировался на видео- и фотокамеру, что позволило в дальнейшем более детально изучить механизмы разрушения грунта.

Определение геометрических и силовых характеристик процесса резания вертикальных стенок

Одним из наименее изученных видов является резание вертикальных стенок в забое, хотя такой вид резания встречается при работе многих типов машин. Он имеет свои особенности, которые необходимо учитывать при проектировании рабочих органов, работающих по такому принципу.

Электронная Белорусско-Российского университета

Главной отличительной особенностью этого вида резания является то, что отделяемый от массива грунт выносится из зоны разрушения под действием собственного веса и практически не участвует в процессе резания. Следовательно, вес грунта не будет оказывать влияния и на возникающее сопротивление резанию. Такое заключение справедливо только в том случае, если режущий элемент расположен достаточно высоко над подошвой забоя. Если же режущий элемент расположен в достаточной близости от подошвы забоя, то при расчете сопротивления резанию также следует учесть влияние осыпавшегося грунта. Поскольку такое расположение режущих элементов характерно для некоторых типов рабочих органов, этот тип резания следует исследовать с замером дополнительных величин, характеризующих размеры грунта в перемещаемой призме волочения и боковых валиках, остающихся в забое после прохождения ножа.

Другой отличительной особенностью такого вида резания является влияние веса грунта, расположенного в верхних слоях разрабатываемого массива, на резание нижележащего слоя грунта. Поскольку нижележащие слои грунта испытывают дополнительное давление со стороны вышележащих слоев, повышается их устойчивость, что приводит к увеличению угла сдвига. Это хорошо заметно на рис. 2, а, где стрелками обозначена площадка скольжения, выходящая на вертикальную стенку забоя.

а) б)

Рис. 2. Разрушение грунта при резании вертикального массива грунта

Для определения сопротивления резанию необходимо знать геометрические параметры призмы волочения. Получить расчетные зависимости, позволяющие определить параметры призмы волочения и боковых валиков, можно на основе экспериментальных данных и из следующих рассуждений.

При установившемся процессе такого вида резания срезаемый грунт осыпается на подошву забоя и располагается перед ножом в виде треугольной призмы волочения (рис. 3), перпендикулярной поверхности ножа и наклоненной к горизонту под углом естественного откоса φ. Призма волочения смеща-

Белорусско-Российский библиотека университета

ется ножом в сторону от забоя, формируя после ножа боковые валики. Такое смещение будет происходить при выполнении условия

$$90 - \alpha > \omega,$$

где α – угол резания; ω – угол внешнего трения грунта.

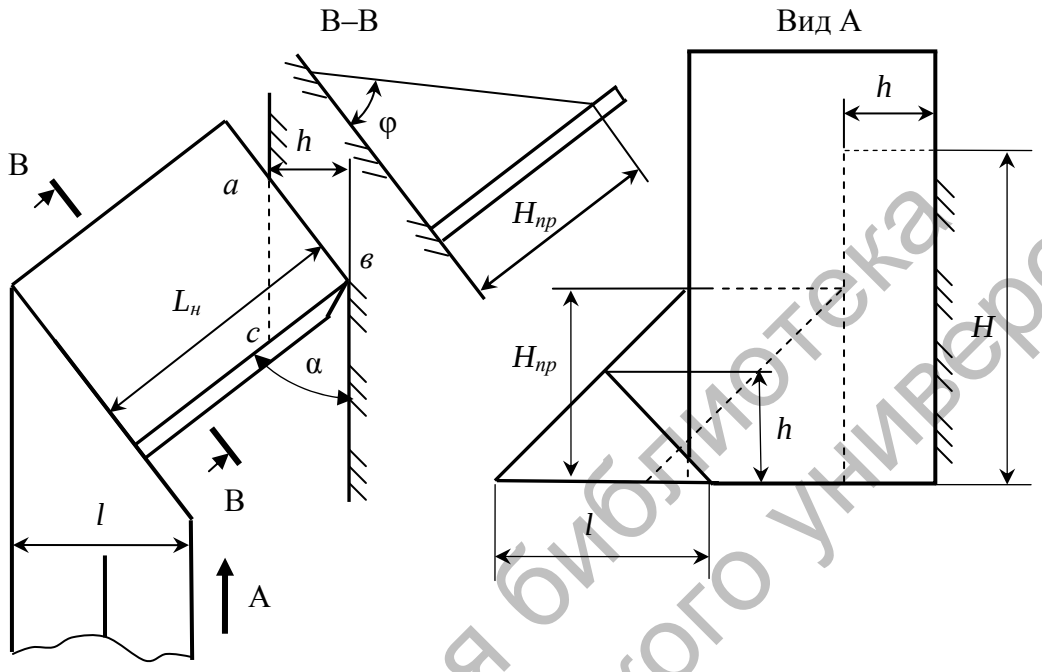

Рис. 3. Расчетная схема резания при движении режущего элемента по подошве забоя

При этом частица грунта переместится по всей длине ножа $L_н$ тогда, когда нож пройдет путь L, связанный с длиной ножа зависимостью

$$L \cdot \cos\alpha = L_н,$$

что видно из треугольника *авс*.

В этом случае нож срежет объем грунта

$$V = L \cdot H \cdot h,$$

где H – высота срезаемого слоя; h – толщина срезаемой стружки.

Объем призмы волочения

$$V_{пр} = \frac{L_н \cdot H_{пр}^2}{2 \cdot \mathrm{tg}\,\varphi},$$

где $H_{пр}$ – искомая высота призмы волочения.

Ее величину можно найти из соотношения объемов срезаемого грунта и грунта, находящегося в призме волочения:

$$V \cdot k_p = V_{пр},$$

где k_p – коэффициент разрыхления.

Тогда окончательно будем иметь

$$H_{пр} = \sqrt{\frac{2 \cdot H \cdot h \cdot k_p \cdot \mathrm{tg}\,\varphi}{\cos\alpha}}.$$

Таким образом, определены все геометрические размеры призмы грунта, перемещаемой ножом.

Размеры боковых валиков можно найти из аналогичных рассуждений. Поскольку площади поперечного сечения призмы волочения и боковых валиков равны, то из уравнения

Электронная библиотека Белорусско-Российского университета

$$\frac{H_{пр}^2}{2 \cdot \mathrm{tg}\,\varphi} = \frac{h^2}{\mathrm{tg}\,\varphi}$$

можно определить высоту боковых валиков

$$h = 0,707 \cdot H_{пр}.$$

Длина боковых валиков будет равна

$$l = \frac{2 \cdot h}{\mathrm{tg}\,\varphi}.$$

Известные геометрические размеры призмы волочения и боковых валиков позволяют перейти к расчету силовых параметров, характеризующих резание вертикальных массивов грунта при перемещении ножа по подошве забоя [5].

Рассмотрим силы, действующие при резании вертикальной стенки.

При резании вертикальной стенки угол сдвига увеличивается с увеличением глубины (см. рис. 2, б). Это связано с увеличением давления верхнего слоя грунта, что приводит к повышению устойчивости грунта. При малой глубине резания этот эффект является слабовыраженным и не вносит существенной погрешности при расчете. В связи с этим будем считать угол сдвига постоянным по всей глубине.

Рассмотрим силы, действующие на вырезаемый объем грунта в горизонтальной плоскости *XOY* (рис. 4): $E_{\max}$ – реакция со стороны неразрешенного массива, отклоненная от нормали под углом внутреннего трения грунта ρ; $R_{\max}$ – реакция со стороны ножа, отклоненная от нормали под углом внешнего трения ω; C_{OB} – сила сцепления грунта.

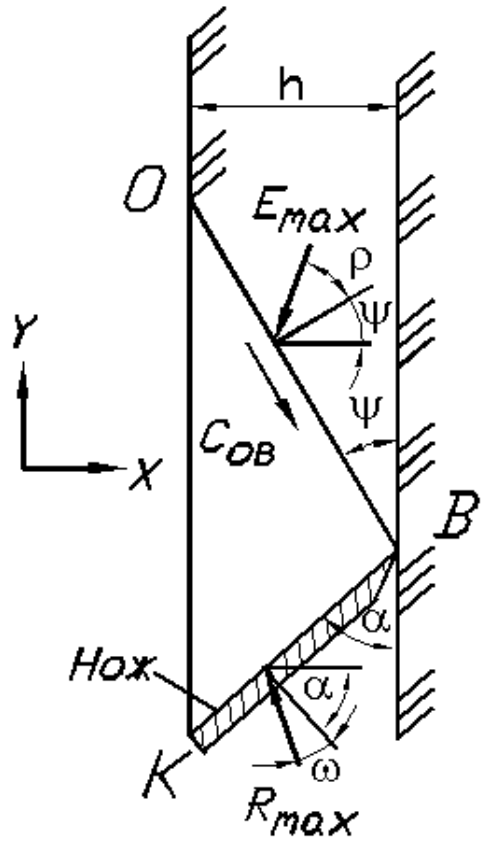

Рис. 4. Расчетная схема для определения угла сдвига

Электронная библиотека Белорусско-Российского университета

Спроецировав действующие силы на оси X и Y, получим уравнения:

$$\begin{cases} \sum X = -R_{\max} \cdot \sin(\alpha+\omega) - \\ -E_{\max} \cdot \cos(\psi+\rho) + C_{OB\max} \cdot \sin\psi = 0; \\ \sum Y = R_{\max} \cdot \sin(\alpha+\omega) - \\ -E_{\max} \cdot \sin(\psi+\rho) - C_{OB\max} \cdot \cos\psi = 0. \end{cases}$$

Выразив из системы неизвестные $E_{\max}$ и $R_{\max}$, получим уравнения:

$$E_{\max} = \frac{1}{\sin(\alpha+\omega+\psi+\rho)} \times$$
$$\times\left[-C_{OB\max} \cdot \cos(\alpha+\omega+\psi)\right];$$
$$R_{\max} = \frac{1}{\sin(\alpha+\omega)} \times$$
$$\times\left[E_{\max} \cdot \sin(\psi+\rho) + C_{OB\max} \cdot \cos\psi\right].$$

Переменные $E_{\max}$ и $R_{\max}$ зависят от угла скольжения ψ на данном этапе неизвестного. Угол сдвига ψ можно определить, зная приведенное давление на площадку скольжения q по методике из [3]. Приведенное давление q зависит от действительного давления на площадку сдвига q' и давления связности H. В общем виде формулу для определения q' можно записать как

$$q_{\max} = \frac{E_{\max}}{S_{пл}} + \frac{c}{\sin\rho},$$

где $S_{пл}$ – площадь площадки скольжения, м^2; c – сцепление грунта, Па; ρ – угол внутреннего трения грунта.

При выполнении условия

$$q \geq H \cdot \frac{\cos\rho}{1-\sin\rho}$$

существуют решения с сингулярной точкой, для которых расчетный угол сдвига определится по формуле

$$\psi_p = \frac{\pi}{4} - \frac{\rho}{2} - \frac{c \cdot \operatorname{tg}\rho}{2} \cdot \ln A,$$

где

$$A = \frac{q}{p} \cdot \frac{1-\sin\rho}{\cos\rho}.$$

Если условие не выполняется, то существуют разрывные решения, для которых

$$\psi_p = \frac{3\pi}{4} - \frac{\rho}{2} - \Delta p,$$

где Δp – угол, рассчитываемый по углу отклонения δ_p приведенного давления на площадке разрыва:

$$\Delta p = \arcsin\frac{\sin\delta_p}{\sin\rho}.$$

При этом

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

Уравнения позволяют найти величину угла сдвига при известном приведенном давлении, действующем на площадку в грунте в момент сдвига.

Определим силу, действующую в направлении движения ножа:

$$F_1 = R \cdot \sin(\omega+\alpha).$$

Приведенный выше расчет позволяет определить геометрические и силовые параметры процесса резания вертикального массива, когда верхняя грань ножа находится на поверхности, а высота ножа достаточно мала, чтобы принять угол сдвига постоянным по всей высоте ножа.

Чтобы получить зависимость угла резания от глубины, следует поделить нож по высоте на некоторое количество участков, достаточно малых по высоте. На каждом из участков условно принимаем угол сдвига постоянным. Влияние вышележащих слоев на нижние учитываем следующим образом. Давление на площадку сдвига увеличиваем на величину

$$Q = \gamma \cdot g \cdot h \cdot \xi,$$

где γ – объемная плотность грунта; g – гравитационная постоянная, g = 9,81 м/с^2;

Электронная библиотека Белорусско-Российского университета

h – сумма высот всех вышележащих участков; ξ – коэффициент бокового давления.

Повышение давления на площадке сдвига приведет к уменьшению угла сдвига, что подтверждается экспериментальными исследованиями (см. рис. 2, б).

Далее рассмотрим силы, действующие на призму волочения (рис. 5).

На призму действуют силы: $E_{пр}$ – реакция со стороны неразрушенного массива, отклоненная от нормали под углом внутреннего трения ρ; $R_{пр}$ – реакция со стороны ножа, отклоненная от нормали под углом внешнего трения ω; T – сила трения призмы о подошву забоя.

Силу трения определим по формуле

$$T = G_{пр} \cdot \operatorname{tg} \rho = V_{пр} \cdot \gamma \cdot \operatorname{tg} \rho.$$

Для определения двух оставшихся сил спроецируем все силы, действующие на призму, на оси координат X и Y:

$$\begin{cases} \sum X = T \cdot \sin\psi - R_{пр} \cdot \cos(\omega + \alpha) - \\ - E_{пр} \cdot \cos(\rho + \psi) = 0; \\ \sum Y = -T \cdot \cos\psi + R_{пр} \cdot \sin(\omega + \alpha) - \\ - E_{пр} \cdot \sin(\rho + \psi) = 0. \end{cases}$$

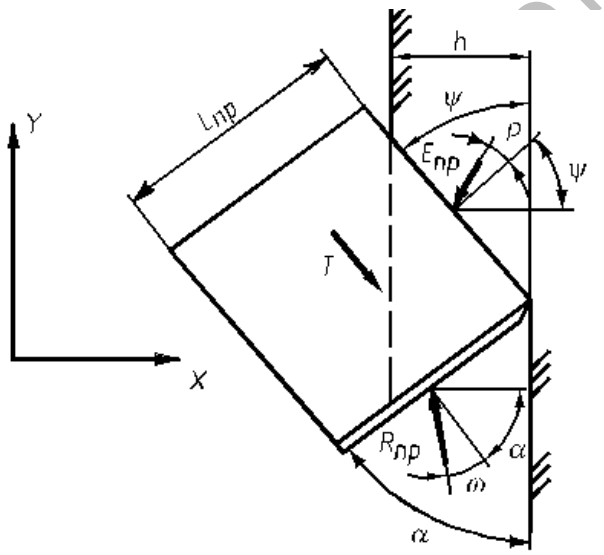

Рис. 5. Расчетная схема для определения сил, действующих на призму волочения

Выразим из системы неизвестные $R_{пр}$ и $E_{пр}$:

$$R_{пр} = \frac{T \cdot \cos(\omega + \alpha - \psi)}{\sin(\omega + \alpha + \rho + \psi)};$$

$$E_{пр} = \frac{-T \cdot \cos(\omega + \alpha + \psi)}{\sin(\omega + \alpha + \rho + \psi)}.$$

Сила, действующая на нож в направлении движения ножа:

$$F_2 = R_{пр} \cdot \sin(\omega + \alpha).$$

Суммарное усилие сопротивления резанию:

$$F = F_1 + F_2 = (R + R_{пр}) \cdot \sin(\omega + \alpha).$$

Теоретические исследования

Произведем расчет резания грунта по предложенной методике.

Исходные данные:

– высота ножа H = 70 мм;

– ширина ножа B = 30 мм;

– углы резания α = 25, 35, 45, 55°;

Характеристики грунта:

– угол внутреннего трения ρ = 28°;

– угол внешнего трения ω = 26°;

Электронная библиотека Белорусско-Российского университета

– плотность грунта $\rho_{гр}$ = 1,8 т/м^3.

– сцепление грунта C = 50 кПа.

В результате расчетов получили зависимости, представленные на рис. 6 и 7.

Из графиков (см. рис. 6) видно, что угол сдвига увеличивается с увеличением глубины. Это подтверждает сделанное ранее предположение о влиянии веса верхних слоев грунта на нижние. Также можно заметить, что с увеличением угла резания угол сдвига уменьшается, что хорошо согласуется с существующими теориями резания грунта.

На рис. 7 приведена зависимость сопротивления резанию от угла резания, из которой видно, что наименьшее значение сопротивления резанию достигается при значении угла резания α = 45°.

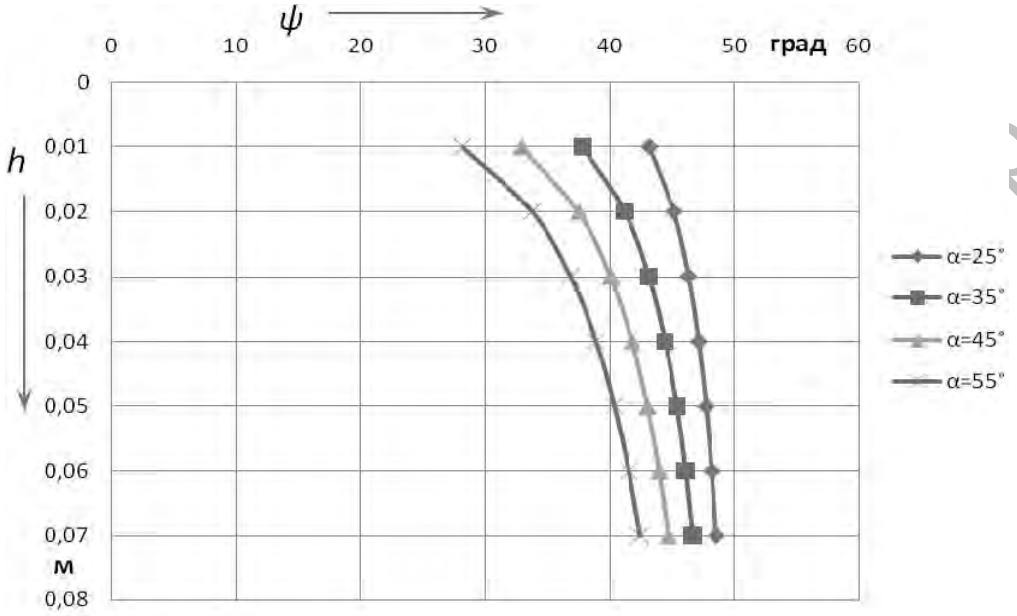

Рис. 6. Зависимость угла сдвига ψ от глубины h

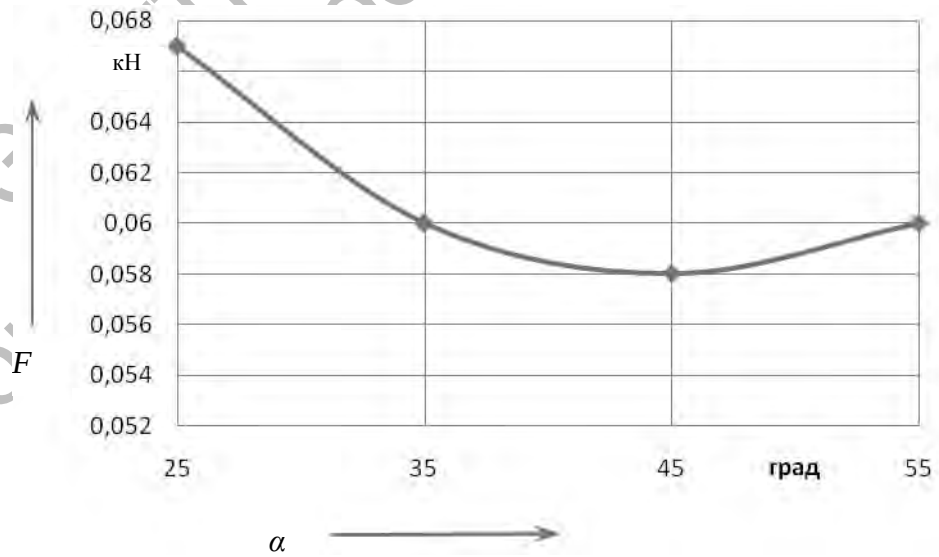

Рис. 7. Зависимость сопротивления F от угла резания α

Белорусско-Российского университета

Заключение

Проведенные исследования позволили выяснить физическую картину разрушения грунта при резании вертикального массива, получить зависимости для определения численных значений силовых и геометрических параметров и создать базу для разработки методики расчета резания вертикальных стенок в грунте.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Зеленин, А. Н.** Лабораторный практикум по резанию грунтов / А. Н. Зеленин, Г. Н. Карасев, Л. В. Красильников. – М. : Высш. шк., 1969. – 312 с.

2. **Ветров, Ю. А.** Резание грунтов землеройными машинами / Ю. А. Ветров. – М. : Машиностроение, 1971. – 360 с.

3. **Берестов, Е. И.** Разрушение грунта плоским клином / Е. И. Берестов // Интерстроймех–2002 : тез. докл. междунар. конф. – Могилев : Белорус.-Рос. ун-т, 2002. – С. 41–47.

4. **Берестов, Е. И.** Аналитическая модель косого резания грунта / Е. И. Берестов, А. П. Стригоцкая // Строительные и дорожные машины. – 2003. – № 4. – С. 42–46.

5. **Берестов, Е. И.** Современные проблемы и методы расчета сопротивления грунта резанию (обзор) / Е. И. Берестов, А. П. Смоляр // Изв. Нац. акад. наук Беларуси. – 2005. – № 3. – С. 44–49.

Белорусско-Российский университет
Материал поступил 10.04.2008

E. I. Berestov, R. I. Kutynko
Experimental investination of cutting the soil

The paper presents the description of experimental plants for soil cutting research. The peculiarities of vertical massif cutting of soil are considered and dependences for force and geometric parameters calculation are given in the paper.

Электронная библиотека Белорусско-Российского университета