УДК 631.312

4.3. Агроинженерия и пищевые технологии

ОПРЕДЕЛЕНИЕ КОЭФФИЦИЕНТА УДЕЛЬНОГО СОПРОТИВЛЕНИЯ ПОЧВЫ РЕЗАНИЮ МЕТОДАМИ СТАТИКИ СЫПУЧЕЙ СРЕДЫ

Алябьев Алексей Федорович
д.т.н., старший научный сотрудник
Scopus Author ID: 57208470075
РИНЦ SPIN-код: 6093-1882
alyabiev@bmstu.ru
Мытищинский филиал МГТУ им. Н. Э. Баумана, Россия, 141005, Московская обл., г. Мытищи, ул. 1-я Институтская, д. 1

Котов Алексей Александрович
д.т.н., доцент
Scopus Author ID: 57220509462
РИНЦ SPIN-код: 7846-4511
kotov@bmstu.ru
Мытищинский филиал МГТУ им. Н. Э. Баумана, Россия, 141005, Московская обл., г. Мытищи, ул. 1-я Институтская, д. 1

Тазов Даниил Сергеевич
ассистент
РИНЦ SPIN-код: 2128-4662
tazov.d@bmstu.ru
Мытищинский филиал МГТУ им. Н. Э. Баумана, Россия, 141005, Московская обл., г. Мытищи, ул. 1-я Институтская, д. 1

Для разных углов резания рассмотрены две схемы определения коэффициента удельного сопротивления почвы резанию двугранным клином методами статики сыпучей среды. Для малых углов резания использовалась схема В.П. Горячкина, согласно которой рабочая поверхность клина вдавливает почву в пласт. Образующаяся при этом область предельного равновесия при движении клина растёт. Нарушение равновесия, сдвиг почвы, происходит при выходе области предельного равновесия на дневную поверхность почвы. Используя ранее полученные уравнения, производился расчет коэффициента удельного сопротивления почвы резанию. Для больших углов резания использовалась схема задачи пассивного давления засыпки на подпорную стенку. В качестве подпорной стенки рассматривается рабочая поверхность клина, при движении которого образуется область предельного равновесия. Нарушение равновесия, сдвиг почвы, происходит при превышении давления на рабочей поверхности клина удерживающего давления почвы. Используя уравнения статики сыпучей среды, производились расчеты коэффициента удельного сопротивления

UDC– 631.312

4.3. Agricultural Engineering and Food Technologies

DETERMINATION OF THE SOIL CUTTING RESISTANCE COEFFICIENT USING METHODS OF GRANULAR MEDIA STATICS

Alyabiev Alexey Fedorovich
Dr.Sci.Tech., Senior Researcher
Scopus Author ID: 57208470075
RSCI SPIN-code: 6093-1882
alyabiev@bmstu.ru
Mytishchi branch Bauman Moscow State Technical University, Russia, 141005, Moscow region, Mytishchi, 1ya Institutskaya, 1

Kotov Alexey Alexandrovich
Dr.Sci.Tech., Associate Professor
Scopus Author ID: 57220509462
RSCI SPIN-code: 7846-4511
kotov@bmstu.ru
Mytishchi branch Bauman Moscow State Technical University, Russia, 141005, Moscow region, Mytishchi, 1ya Institutskaya, 1

Tazov Daniil Sergeevich
assistant
RSCI SPIN-code: 2128-4662
tazov.d@bmstu.ru
Mytishchi branch Bauman Moscow State Technical University, Russia, 141005, Moscow region, Mytishchi, 1ya Institutskaya, 1

Two schemes for determining the coefficient of specific resistance of soil to cutting with a dihedral wedge using the methods of statics of granular media are considered for different cutting angles. For small cutting angles, V.P. Goryachkin’s model was employed, wherein the wedge's working surface presses the soil into the soil mass. The zone of limiting equilibrium formed during the wedge's movement expands; equilibrium failure—manifesting as soil displacement—occurs when this zone reaches the soil surface. Calculations of the specific soil cutting resistance coefficient were performed using previously derived equations. For large cutting angles, the model for passive backfill pressure against a retaining wall was applied. The wedge's working surface was treated as the retaining wall, with a zone of limiting equilibrium forming during its movement. Equilibrium failure (soil displacement) occurs when the pressure exerted on the wedge's working surface exceeds the soil's resisting pressure. Using the equations of granular media statics, calculations were performed to determine the soil's specific cutting resistance coefficient and the minimum permissible cutting angle at which the given calculation model remains valid. Based on these calculations, graphs plotting the

почвы резанию и минимально допустимого угла резания, при котором данная расчетная схема работает. Для пяти образцов почвы по произведённым расчетам были построены графики зависимости коэффициента удельного сопротивления почвы резанию от угла резания, которые показали сходимость результатов по рассмотренным схемам разрушения почвы на границе их использования, что позволило сделать вывод о возможности использования рассмотренных методов расчета для определения коэффициента удельного сопротивления почвы резанию при изменении угла резания от 7°, при которых начинается резание с образованием элемента пласта, до углов резания более 100°

specific cutting resistance coefficient against the cutting angle were generated for five soil samples; these graphs demonstrated result convergence between the analyzed soil failure models at the boundaries of their applicability, leading to the conclusion that the examined calculation methods can be used to determine specific cutting resistance coefficients across a range of cutting angles—from 7° (where cutting begins with the formation of a soil slice element) up to angles exceeding 100°

Ключевые слова: ОБРАБОТКА ПОЧВЫ, РЕЗАНИЕ ПОЧВЫ, ДВУГРАННЫЙ КЛИН, СОПРОТИВЛЕНИЕ РЕЗАНИЮ, СТАТИКА СЫПУЧЕЙ СРЕДЫ

Keywords: SOIL TILLAGE, SOIL CUTTING, DIHEDRON WEDGE, CUTTING RESISTANCE, STATICS OF GRANULAR MEDIA

http://dx.doi.org/10.21515/1990-4665-222-002

Резание почвы почвообрабатывающим рабочим органом сводится к взаимодействию клина с почвой [1]. Основным параметром двугранного клина является угол резания. У почвообрабатывающих орудий угол резания изменяется в широких пределах. При работе на малых скоростях силу сопротивления определяют по двухзвенной формуле В.П. Горячкина [1]:

$$P = f_{\text{п}}G + kab\ , \qquad (1)$$

где P – общее тяговое сопротивление почвообрабатывающего орудия; G – вес почвообрабатывающего орудия; $f_{\text{п}}$ – коэффициент протаскивания почвообрабатывающего орудия по почве; k – коэффициент удельного сопротивления почвы резанию; a – глубина обработки почвы; b – ширина захвата.

При изменении угла резания коэффициент k в формуле (1) будет меняться. Рассмотрим основанные на статике сыпучей среды методы расчета коэффициента удельного сопротивления k при различных углах резания. Статика сыпучей среды занимается изучением предельного

состояния, при котором малое изменение объемных или поверхностных сил приводит к разрушению (потере равновесия). Такое предельное состояние называется предельным напряженным состоянием. Наиболее общие методы решения задач статики сыпучей среды разработаны В.В. Соколовским [2]. Разрушение почвы клином происходит при достижении на какой-либо площадке касательными напряжениями τ предельных значений, определяемых законом Кулона:

$$|\tau| = \sigma_n \cdot \mathrm{tg}\rho + C,$$

где, σ_n – нормальное напряжение на площадке даН/см^2, C – сцепление почвы, даН/см^2, ρ – угол внутреннего трения почвы, град.

Для расчёта сил сопротивления резанию грунта землеройными машинами используется расчетная схема задачи пассивного давления грунта на подпорную стенку [3], [4], [5]. Эта расчётная схема обеспечивает приемлемую сходимость результатов, однако, если вес грунта не учитывать, то давление на нож не меняется по его высоте, что не соответствует представлению о процессе разрушения грунта при малых углах резания характерных для лемешного плуга [1]. Кроме схемы пассивного давления грунта на подпорную стенку разработаны схемы, в которых линии скольжения строятся на основе экспериментальных данных [6], [7], а взаимодействие на этих линиях скольжения описывается соотношениями одной из задач статики сыпучей среды [2], в частности, в работе [6] это соотношения задачи устойчивости откоса.

При малых углах резания, характерных для работы лемешных плугов, используется схема взаимодействия клина с почвой В.П. Горячкина. В работе [8] задача образования элемента пласта по В.П. Горячкину: «клин прежде всего уплотняет почву, вдавливая частицы внутрь пласта, затем скалывает ее», решена с использованием методов статики сыпучей среды. Здесь также получена приемлемая сходимость

результатов, однако, при больших углах резания расчётная схема не будет соответствовать характеру взаимодействия клина с почвой.

Таким образом, если диапазон изменения угла резания большой, то характер взаимодействия клина с почвой будет разным и для расчёта сил сопротивления резанию необходимо использовать разные расчётные схемы. При малых углах резания, характерных для работы лемешных плугов, используем схему взаимодействия клина с почвой В.П. Горячкина. При больших углах резания взаимодействие клина с почвой будем рассматривать как задачу пассивного давления засыпки на подпорную стенку. Целью работы является определение удельного сопротивления почвы в широком диапазоне изменения угла резания. Учитывая, что обе расчетные схемы обеспечивают приемлемую сходимость результатов, то необходимо рассмотреть вопросы о границах применения этих расчётных схем и о непрерывности коэффициента удельного сопротивления почвы резанию на границах их применения.

Рассмотрим взаимодействие двугранного клина с почвой при малых углах резания и постоянной глубине резания. В работе [8] для задачи образования элемента пласта по В.П. Горячкину методом характеристик определены угол резания α_1, при котором начинается резание с образованием элементов пласта, и коэффициент удельного сопротивления k_1 для этого вида резания. Методом наименьших квадратов результаты расчетов были аппроксимированы уравнениями [8]:

$$\alpha_1 = 8{,}5 - 0{,}2292E + 4{,}896C + 15{,}69C \cdot \mathrm{tg}\rho - 15{,}23C \cdot \mathrm{tg}\rho_м,$$

$$k_1 = \frac{1}{2}C(B_1 + D_1 \mathrm{tg}\alpha_0), \qquad (2)$$

$$B_1 = 0{,}29 - 0{,}461\mathrm{tg}\rho + 1.09\mathrm{tg}\rho_м,$$

$$D_1 = 1{,}308\mathrm{tg}\rho + 1.016\mathrm{tg}\rho_м.$$

где α_1 – угол резания, при котором начинается резание с образованием элементов пласта, град, E – модуль деформации почвы, даН/см^2, $\rho_м$ – угол

трения почвы о клин, град, α_0 – угол резания, град. Уравнение для определения коэффициента удельного сопротивления почвы k_1 переписано в виде акцентирующем его зависимость от угла резания α_0. Уравнения получены при $18° \le \rho \le 35°$, $14° \le \rho_м \le 34°$, $0{,}4 \le C \le 1{,}2$, $24 \le E \le 32$, $\alpha_1 \le \alpha_0 \le 60°$.

Необходимо уточнить следующее. При образовании элемента пласта сначала происходит «вдавливание почвы в пласт», при котором сила сопротивления увеличивается, затем происходит сдвиг почвы, при котором сила сопротивления падает. Будем считать, что разгрузка клина при сдвиге полная. Аналогично изменяется и коэффициент удельного сопротивления почвы. По формуле (2) определяется среднее значение k_1.

При больших углах резания взаимодействие почвы с рабочей поверхностью клина рассматривается как задача пассивного давления засыпки на подпорную стенку. Необходимо учитывать особенности работы клина: клин движется, образуется область предельного равновесия, далее происходит разгрузка (сдвиг) и как далее. Вследствие линейной деформируемости почвы, нагрузка при формировании области предельного равновесия будет расти линейно. Принимая, что разгрузка при сдвиге полная, а максимальное значение давления на рабочую поверхность клина определяется из решения задачи пассивного давления засыпки на подпорную стенку, получим, что средние значение давления будет равно половине максимального давления на рабочую поверхность клина.

В нашем случае при невесомой почве приведённое нормальное давление p (рис. 1) будет равномерно распределено и равно временному сопротивлению всестороннему равномерному растяжению H [2]:

$$p = H = C\mathrm{ctg}\rho\ .$$

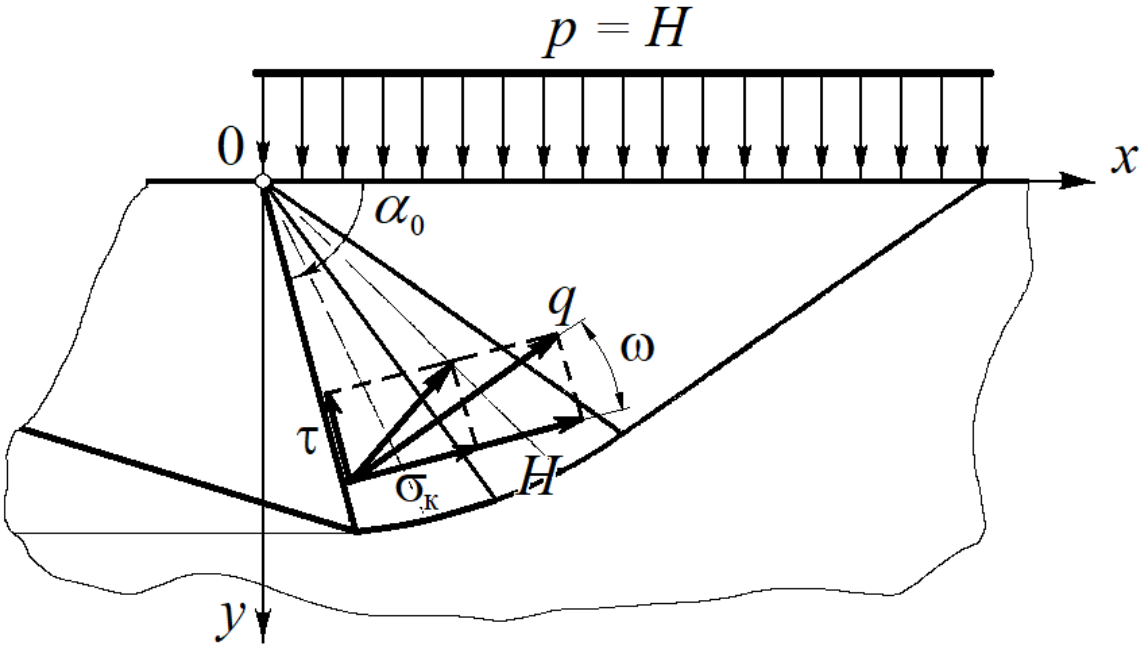


Рисунок 1 – Схема образования пласта при больших углах резания

Угол резания при решении задачи пассивного давления засыпки на подпорную стенку должен быть не меньше следующего значения [2]:

$$\alpha_{0min} \geq \frac{\pi}{2} - \frac{1}{2}(\Omega + \omega)\,, \qquad (3)$$

где ω – угол между приведённым давлением q и нормалью к рабочей поверхности клина; Ω – обозначение:

$$\sin\Omega = \frac{\sin\omega}{\sin\rho}\,.$$

Приведённое давление q на рабочей поверхности клина равномерно распределено и равно [2]:

$$q = \frac{p}{1-\sin\rho}\,\frac{\sin(\Omega+\omega)}{\sin\Omega}\,e^{[(2\alpha_0-\pi+\Omega+\omega)\mathrm{tg}\,\rho]}\,. \qquad (4)$$

Для определения q необходимо знать угол ω. Для его определения составим уравнения (рис. 1):

$$\tau = q\sin\omega\,,$$
$$\tau = \sigma_к\,\mathrm{tg}\,\rho_м\,, \qquad (5)$$
$$\sigma_к + H = q\cos\omega\,.$$

где $\sigma_к$ и τ – нормальная и касательная составляющие действительного давления почвы на рабочую поверхность клина.

Решая уравнения (4) и (5), находим значения $\sigma_к$, τ, и коэффициент удельного сопротивления почвы резанию k_2:

$$k_2 = \sigma_к \sin\alpha_0 - \tau \cos\alpha_0 .$$

Уравнения (4) и (5) решались численным методом.

Построим графики изменения коэффициентов удельного сопротивления почвы резанию k_1 и k_2 в зависимости от угла резания α_0:

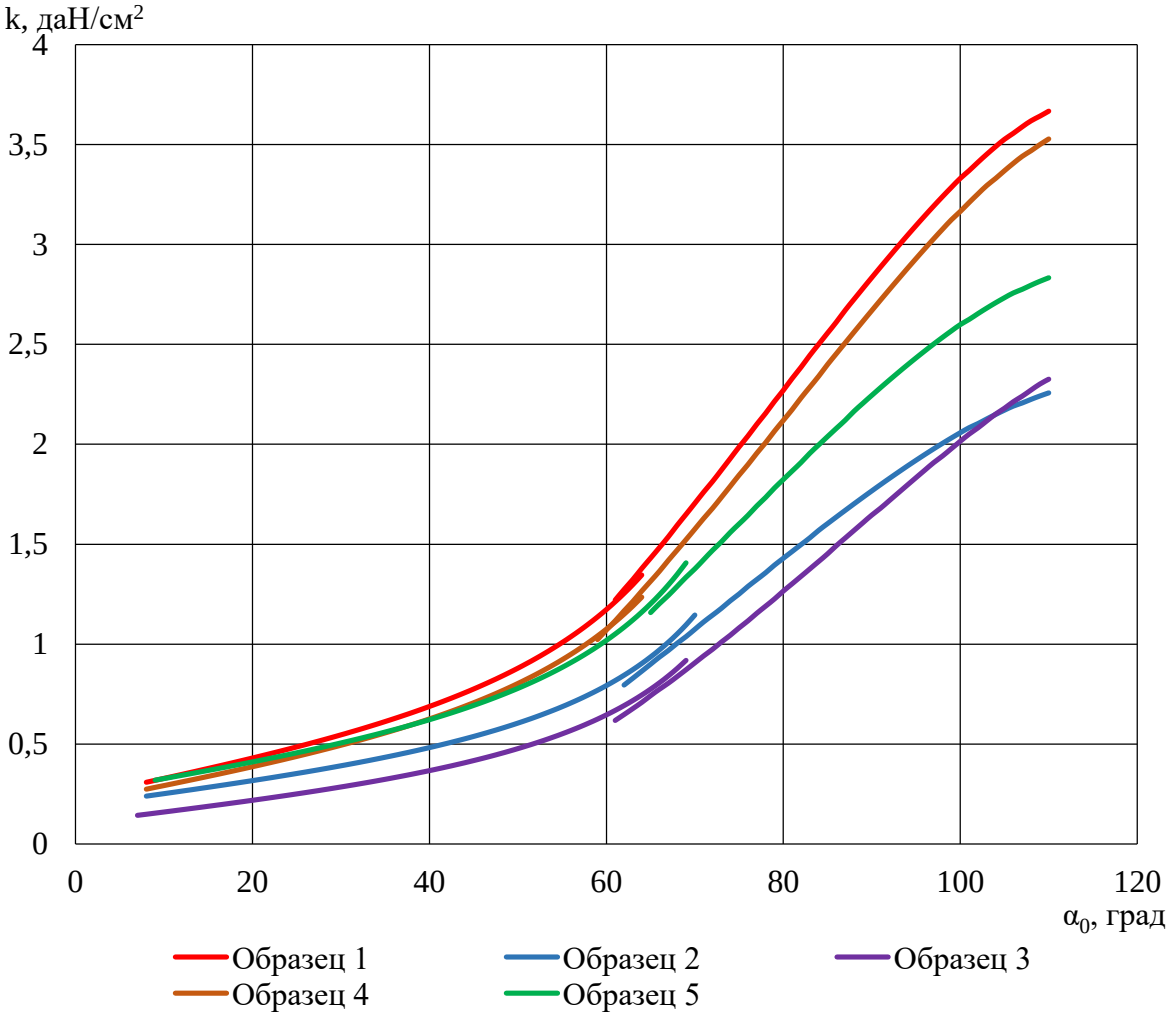


Рисунок 2 – График зависимости коэффициентов удельного сопротивления почвы резанию k_1 и k_2 от угла резания α_0

Графики построены для почв, характеристики прочности которых приведены в таблице.

Таблица. – Характеристики прочности почвы

Образцы почвы	Сцепление почвы С, даН/см^2	Угол внутреннего трения почвы ρ, град	Угол трения почвы о клин $\rho_м$, град
Образец 1	0,8	32	28
Образец 2	0,8	21,8	18,8
Образец 3	0,5	33	21,5
Образец 4	0,73	33	27,5
Образец 5	1	21,8	19,8

Образцы почвы брались в 26В квартале Хотьковского участкового лесничества Сергиево-Посадского филиала ГАУ МО «Мособллес», характеристики прочности почвы определялись методом одноплоскостного среза по ГОСТ 12248.1-2020.

Из графиков видно, что коэффициенты удельного сопротивления почвы резанию k_1 и k_2, определяемые по рассматриваемым методам расчёта, имеют практически одинаковы значения при углах резания 60 – 70°. Границу применимости методов будем оценивать минимальным углом резания при решении задачи пассивного давления засыпки на подпорную α_{0min} (3). При изменении угла резания α_0 изменяется ω и, следовательно, Ω, и α_{0min}. Построим график зависимости минимального угла резания при решении задачи пассивного давления α_{0min} от угла резания α_0, также проведём линию α_0. Значение α_{0min}, лежащее на пересечении этих линий, будет минимальным углом резания при решении задачи пассивного давления засыпки на подпорную. На рис. 3 приведены графики соответствующие первому образцу почвы.

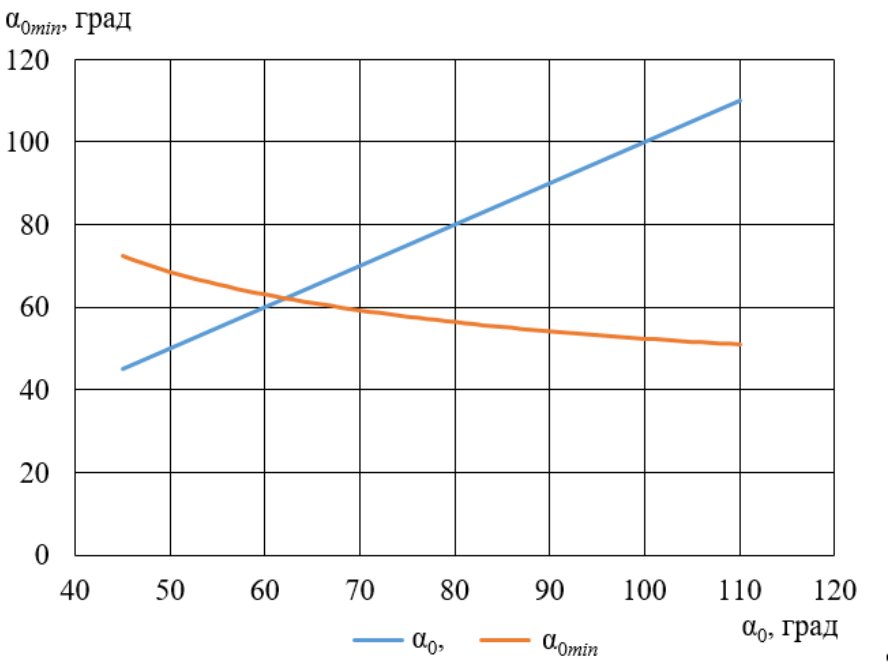


Рисунок 3 – График зависимости минимального угла резания α_{0min} от угла резания α_0

Для рассмотренных образцов почвы минимальные углы резания при решении задачи пассивного давления засыпки на подпорную α_{0min}, соответственно, равны 62°, 71°, 69°,63° и 70°. Для этих значений разница между коэффициентами удельного сопротивления почвы резанию k_1 и k_2 для рассмотренных образцов, соответственно, равна -0,020, 0,089, 0,047, -0,023, 0,093 даН/см^2, что в процентах относительно значений k_1, соответственно, составляет -1,6, 7,4, 5,1, -1,94, 6,4 %. Для почвы это высокие показатели сходимости, и можно говорить о непрерывности коэффициента удельного сопротивления почвы резанию на границе использования рассмотренных методов расчета.

Таким образом рассмотрены две схемы взаимодействия клина с почвой при её резании. При малых углах резания это схема В.П. Горячкина, при больших углах резания это схема пассивного давления засыпки на подпорную стену. Установлено, что при определении коэффициента удельного сопротивления почвы резанию граница использования этих расчетных схем находится в диапазоне изменения угла резания 60° – 70°, невязка коэффициента удельного сопротивления почвы

резанию на границе находится в диапазоне от -2 % до 7,5%, что позволяет сделать вывод о возможности использования рассмотренных расчетных схем для определения коэффициента удельного сопротивления почвы при изменении угла резания от 7° до углов резания более 100°.

Литература.

1. Горячкин, В. П. Собрание сочинений в трёх томах. – М.: Колос, 1968. – 2-е изд. – Т. 2. – 460 с.

2. Соколовский, В. В. Статика сыпучей среды. -М.: Наука, 1990. -272 с.

3. Артемьев, К. А. Основы теории копания грунта скреперами. – М. ; Свердловск : Машгиз, 1963. – 128 с.

4. Баловнев, В. И. Новые методы расчета сопротивлений резанию грунтов. – М. : Росвузиздат, 1963. – 95 с.

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

6. Берестов, Е. И. Взаимодействие рабочего оборудования и гусеничных траков землеройных машин с грунтом : монография / Е.И. Берестов, А.В. Кулабухов, А.П. Смоляр и др.// – Могилев : Белорус.-Рос. ун-т, 2013. – 184 с. : ил. ISBN 978-985-492-128-0

7. Тарасов, В. Н. Механика копания грунтов, основанная на теории предельных касательных напряжений / В. Н. Тарасов, М. В. Коваленко // Строительные и дорожные машины. – 2003. – № 7. – С. 38-43. – EDN WVUGXB.

8. Алябьев, А.Ф. Обоснование технологических комплексов машин для лесовосстановления: монография. – М.: ГОУ ВПО МГУЛ, 2010. – 265 с. ISBN 978-5-8135-0529-4

Литература.

1. Goryachkin, V. P. Sobranie sochinenij v tryoh tomah. – M.: Kolos, 1968. – 2-e izd. – T. 2. – 460 s.

2. Sokolovskij, V. V. Statika sypuchej sredy. -M.: Nauka, 1990. -272 s.

3. Artemev, K. A. Osnovy teorii kopaniya grunta skreperami. – M. ; Sverdlovsk : Mashgiz, 1963. – 128 s.

4. Balovnev, V. I. Novye metody rascheta soprotivlenij rezaniyu gruntov. – M. : Rosvuzizdat, 1963. – 95 s.

5. Vetrov, Yu. A. Rezanie gruntov zemlerojnymi mashinami. – M. : Mashinostroenie, 1971 . – 360 s.

6. Berestov, E. I. Vzaimodejstvie rabochego oborudovaniya i gusenichnyh trakov zemlerojnyh mashin s gruntom : monografiya / E.I. Berestov, A.V. Kulabuhov, A.P. Smolyar i dr.// – Mogilev : Belorus.-Ros. un-t, 2013. – 184 s. : il. ISBN 978-985-492-128-0

7. Tarasov, V. N. Mehanika kopaniya gruntov, osnovannaya na teorii predelnyh kasatelnyh napryazhenij / V. N. Tarasov, M. V. Kovalenko // Stroitelnye i dorozhnye mashiny. – 2003. – № 7. – S. 38-43. – EDN WVUGXB.

8. Alyabev, A.F. Obosnovanie tehnologicheskih kompleksov mashin dlya lesovosstanovleniya: monografiya. – M.: GOU VPO MGUL, 2010. – 265 s. ISBN 978-5-8135-0529-4