

ЭЛЕМЕНТЫ ТЕОРИИ ДИСТОРТНОСТИ В ОЦЕНКЕ «ПАСПОРТА ПРОЧНОСТИ» ГРУНТОВ

Б.Ф. Зюзин¹, А.И. Жигульская¹

¹ Тверской государственной технической университет, Тверь, Россия,
e-mail: 9051963@gmail.com

Аннотация: Расчет технологических режимов и конструктивных параметров оборудования связан с основными структурно-механическими свойствами грунтов, влияющими на условия взаимодействия рабочих органов машин со слабыми грунтами, к которым относят торфяные залежи. Модели в теории дистортности играют ключевую роль, поскольку они позволяют наглядно и формально представлять сложные и абстрактные явления, упрощают их понимание и создают платформу для точного анализа и прогнозирования. Дистортность стала проявляться как способность системы переходить в различные предельные качественные состояния развития своей структуры. Теория прочности Кулона–Мора широко используется в горном деле применительно к рыхлым несвязным материалам, в данном случае для описания напряженного состояния в торфяном растительном слое перед отвалом бульдозера. Рассматриваются параметры «паспорта прочности» грунта, исходя из схемы определения предельных инвариантов дистортности в механике торфа на примере оценки функционирования бульдозерного оборудования. Обобщены результаты исследований по оценке взаимосвязи сцепления материала, характеризующее его структурную связность между частицами грунта и угла внутреннего трения торфяного материала. Определен критерий инварианта сцепления напряженно-деформированного состояния в зависимости от определяющего параметра – угла внутреннего трения.

Ключевые слова: механика торфяной залежи, «паспорт прочности», инварианты дистортности, критерий инварианта сцепления.

Для цитирования: Зюзин Б. Ф., Жигульская А. И. Элементы теории дистортности в оценке «паспорта прочности» грунтов // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2025. – № 12-2. – С. 21–32. DOI: 10.25018/0236_1493_2025_122_0_21.

Elements of dystortive theory in the evaluation «passport of strength» grounds

B.F. Zyuzin¹, A.I. Zhigulskaya¹

¹ Tver State Technical University, Tver, Russia, e-mail: 9051963@gmail.com

Abstract: Calculation of technological modes and design parameters of equipment is related to the main structural and mechanical properties of soils that affect the conditions of interaction of machine working bodies with weak soils, which include peat deposits. Models in the theory of distortion play a key role as they allow visual and formal representation of complex and abstract phenomena, simplify their understanding and create a platform for accurate analysis and prediction. Distortion has become manifested as the ability of a system to move into different

limiting qualitative states of development of its structure. The Coulomb-Mohr strength theory is widely used in mining as applied to loose incoherent materials, in this case to describe the stress state in peat spread on the deposit before the bulldozer blade. The parameters of the soil «strength passport» are considered, based on the scheme of determining the limiting invariants of distortion in peat mechanics on the example of evaluating the functioning of bulldozer equipment. The results of research on estimating the relationship between the material cohesion, which characterizes its structural connectivity between soil particles and the angle of internal friction of peat material, are summarized. The criterion of stress-strain state cohesion invariant depending on the determining parameter – angle of internal friction – is defined.

Key words: mechanics of peat deposits, «strength passport», invariants of distortion, criteria of coupling invariant.

For citation: Zyuzin B. F., Zhigul'skaya A. I. Elements of dystortive theory in the evaluation «passport of strength» grounds. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2025;(12-2):21-32. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236_1493_2025_122_0_21.

Введение

Комплекс машин и оборудования для разработки торфяных месторождений в условиях повышенной влаги и добычи торфяного сырья на осушенных площадях относится к классу горных машин для открытых горных работ [1].

При этом расчет технологических и конструктивных режимов и параметров оборудования связан с основными структурно-механическими свойствами торфяных залежей, влияющих на условия взаимодействия рабочих органов машин со слабыми грунтами [2], к которым можно отнести торфяные структуры.

Использование бульдозеров играет очень важную роль в повышении эффективности работ, снижении трудозатрат, экономии времени и ресурсов [3]. Бульдозерные технологии широко применялись в простых процессах добычи торфяного сырья влажностью 60% для сельскохозяйственного использования [4]. Наиболее востребованной является бульдозерная технология сдвига торфяного рудила по слабому грунту [5].

Для оценки предельных напряженных состояний многослойных и осадочных пород начиная с середины прошлого века разработан ряд критериев

прочности и разрушения, прочностные характеристики — сцепление и угол внутреннего трения принимались непрерывными функциями направления [6].

Теория дистортности предоставляет универсальные инструменты для анализа и решения задач добычи торфа бульдозером [7].

Модели в теории дистортности играют ключевую роль, поскольку они позволяют наглядно и формально представлять сложные и абстрактные явления, упрощают их понимание и создают платформу для точного анализа и прогнозирования. Модели помогают перевести сложные концепции в доступные и легко читаемые формы, будь то графические изображения, таблицы или математические формулы [7]. При этом в нашем случае целью расчетов является определение силы тяги — главного параметра бульдозера и затрат энергии на выполнение технологического процесса.

Механика торфа и торфяной залежи — одна из частей общей механики грунтов, природных дисперсных (раздробленных) тел, куда входят: механика рыхлых горных пород (природных грунтов); механика органоминеральных масс (торфяных залежей, заболоченных

почв, сапропелей, морских илов и др.) [8].

Целью публикации является оценка энерготехнологических показателей функционирования технологического оборудования с позиций механики торфа и критериев предельных состояний по теории дистортности.

Модель сдвига разрыхленного сырья по торфяной залежи при неустановившемся движении отвала бульдозера

Торфяная залежь представляется в виде пластической среды, которая обладает свойствами трения и сцепления между частицами, составляющими среду. Движение бульдозера по торфяной залежи принимается как неустановившееся при постоянном увеличении объема тела волочения перед отвалом [9].

При выборе параметров оборудования требуется установить на основе прочности грунта силовые и энергетические параметры процесса и его эффективность (действующие силы, сопротивления, мощность двигателя трактора, скорость, напряжения в среде и др.) [9, 10].

Теория прочности Кулона–Мора широко используется в горном деле приме-

нительно к рыхлым несвязным материалам, в данном случае для описания напряженного состояния в торфяном растиле на залежи перед отвалом бульдозера в призме волочения. Грунт рассматривается как вязко-пластичное тело (с трением и сцеплением между частицами).

Напряженное состояние грунта перед отвалом бульдозера

$$\tau = \sigma \operatorname{tg} \varphi + C,$$

где σ — представляет давление призмы грунта на сдвигаемый отвалом расстил разрыхленного торфа толщиной h

$$\sigma = \gamma l^3 / l^2 \text{ или } \sigma = \gamma l.$$

Напряжение сдвига в расстеле торфяного сырья, H/M^2

$$\tau = \gamma l \operatorname{tg} \varphi + C,$$

где γ — объемный вес грунта, H/M^3 ; $\operatorname{tg} \varphi$ — коэффициент внутреннего трения грунта; C — сцепление между частицами грунта; l — обобщенный линейный размер массива грунта, м.

Схема процесса сдвигания торфяного сырья по торфяной залежи бульдозерным отвалом при неустановившемся режиме движения агрегата и реологиче-

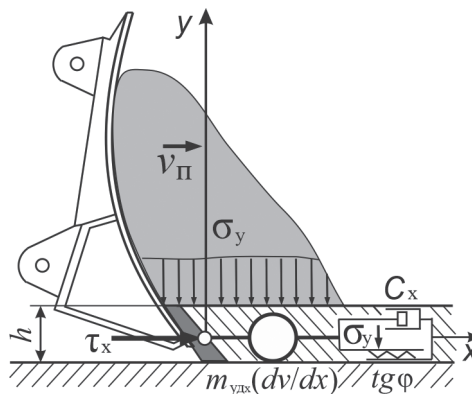


Рис. 1. Схема процесса сдвигания торфяного сырья по торфяной залежи бульдозерным отвалом при неустановившемся режиме движения и механическая модель эквивалента процесса

Fig. 1. Scheme of the peat shearing process on peat deposit by bulldozer blade at unsteady mode of motion and mechanical model of the equivalent process

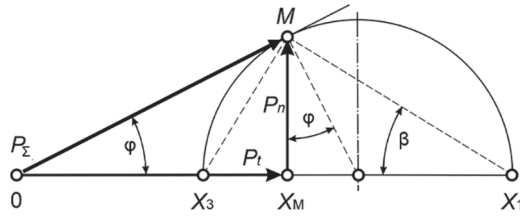


Рис. 2. Схема определения усилия сопротивления среды
 Fig. 2. Scheme for determining the resistance force of the medium

ский эквивалент процесса в виде двух-элементной механической модели Шведова-Бингама показаны на рис. 1 [9, 11].

Уравнение напряжения сдвига материала

$$\tau = \gamma l \operatorname{tg} \varphi + C + m_{\text{уд}} dv/dt.$$

Масса $m_{\text{уд}}$ сдвигаемого участка материала, отнесенная к поверхности сдвига

$$m_{\text{уд}} = \gamma l^3 / g l^2 \text{ или } m_{\text{уд}} = \gamma l / g.$$

Тогда напряжение в расстиле торфяного сырья

$$\tau = \gamma l \operatorname{tg} \varphi + C + (\gamma l / g) (dv/dt).$$

Сила сопротивления сдвиганию слоя торфа в расстиле

$$P = \tau l^2.$$

Двигаясь по поверхности торфяной залежи отвал бульдозера производит упругое сжатие торфяного сырья, которое усиливается по мере продвижения агрегата, что связано не только с воздействием силы тяжести массы грунта, но и с формой рабочей поверхности отвала бульдозера. Вогнутая форма поверхности отвала бульдозера приводит к появлению зоны сжатия грунта, которая во время передвижения агрегата все более увеличивается [12].

Силу сдвига материала можно выразить через ее ортогональные компоненты: P_t — совпадающую с направлением движения отвала и P_n — направленную перпендикулярно поверхности. Сила P_t определяется силой сопротивлению сдвиганию. Нормальная состав-

ляющая P_n определяется в долях величины P_t , полагая, что $P_n = \psi P_t$, где ψ — коэффициент пропорциональности, как отношение составляющих силы реакции грунта на отвал, т.е. $\psi = P_n / P_t$.

Схема предельного состояния структурной системы (рис. 2) может быть применена для оценки предельного сопротивления разрыхленной среды.

Расчетные зависимости для предельного равновесного состояния структурной системы:

$$P_t = X_M = (2X_1 X_3) / (X_1 + X_3);$$

$$P_n = X_M \operatorname{tg} \varphi;$$

$$\psi = \operatorname{tg} \varphi = P_n / P_t; P_\Sigma = X_M / \cos \varphi;$$

$$P_t / P_\Sigma = \cos \varphi; P_n / P_\Sigma = \sin \varphi,$$

где P_n — нормальная составляющая усилия резания; P_t — тангенциальная составляющая усилия резания.

Уравнение напряженно-деформированного состояния (НДС) в виде зависимости

$$(P_n / P_\Sigma)^2 = \sin^2 \varphi = 1 / (1 + 1 / \psi^2),$$

где параметр НДС равен параметру состояния структурной системы $\Pi_{\text{к(н)}} = \psi$ (см. табл. 1) [2].

Величина коэффициента ψ дана в широких пределах ($\psi = 0,3 - 0,7$ для торфа, $\psi = 0,1 - 0,5$ для песка, глины), и точное решение задачи об определении величины силы P оказывается невозможным [2, 7]. Коэффициент ψ зависит от толщины слоя торфа и от физико-механических свойств грунта.

Таблица 1

Предельные состояния
Marginal states

Состояние	«Покой»	«Предельный цикл»	«Скольжение»	«Золотое сечение»	«Качение»	«Верчение»
$P_{к(н)}$	0	1/2	1/3	2/π	1/2	1
ψ	0	0,5	0,577	0,637	0,707	1

В технической литературе [2, 7] величина коэффициента ψ дана в широких пределах ($\psi = 0,3 - 0,7$ для торфа, $\psi = 0,1 - 0,5$ для песка, суглинка, глины), и точное решение задачи об определении величины силы P_n оказывается невозможным.

Коэффициент ψ зависит от формы отвала, остроты режущей кромки, толщины срезаемой стружки и от физико-механических свойств грунта.

При движении бульдозера под действием внешней нагрузки в отдельных точках (областях) грунта эффективные напряжения могут превзойти внутренние связи между частицами грунта, при этом возникнут скольжения (сдвиги) одних частиц по другим и может нарушиться сплошность расстила.

Для практических расчетов зависимость τ от σ представляется в виде уравнения отрезка прямой: $\tau = C_0 + \sigma \operatorname{tg}\varphi$, которое представляет собой в механике грунтов «паспорт прочности» [2]. Здесь параметр C_0 отражает проявление удельного сцепления материала, харак-

теризующее его структурную связность. «Паспорт прочности» устанавливает взаимосвязь определяющих параметров напряженно-деформированных состояний — σ и τ , возникающих в точке среды при взаимодействии отвала бульдозера с расстилом материала учитывая его физико-механические характеристики — C_0 и φ (рис. 3) [13].

На основании «паспорта прочности» решаются основные задачи при проектировании исполнительных рабочих органов горных машин для разработки торфяных месторождений:

- энергетическая задача устанавливает оценку потребляемых энергозатрат (τ) для выполнения заданной производительности горной машины для разработки торфяных месторождений;
- силовая задача позволяет определить возникающие усилия на элементах исполнительных рабочих органов (σ), необходимые для проведения их силовых — прочностных расчетов с учетом статических и динамических режимов их работы.

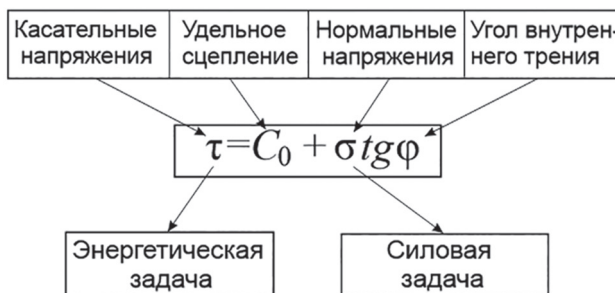


Рис. 3. Структура «паспорта прочности»
Fig. 3. The structure of the «strength passport»

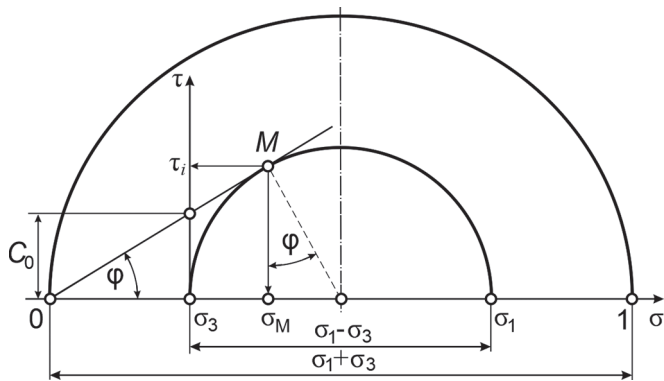


Рис. 4. Диаграмма инвариантов главных напряжений
Fig. 4. Diagram of the invariants of the main stresses

Модельные схемы представления предельных напряженно-деформированных состояний по теории дистортности

Геометрически на диаграмме предельных состояний удельное сцепление C_0 представлено отрезком, отсекаемым на оси τ касательной в предельной точке M (рис. 4).

Для исходных значений инвариантов главных напряжений $0 < \sigma_3 < \sigma_M < \sigma_1$, представим следующую расчетную схему (рис. 4) в инвариантном виде относительно нормированной оси σ_i ($0 < \sigma_i < 1$). Предельное напряженное состояние, или предельное равновесие — это условие начала еще не возникших деформаций в грунте.

Критерий прочности Кулона-Мора [14, 15] как основного условия предельного состояния или условия прочности

для органоминеральных связных грунтов представляет собой линейную зависимость касательных напряжений материала от величины приложенных нормальных напряжений

$$\tau = \sigma_3 \operatorname{tg} \varphi + C_0,$$

где τ — величина инварианта касательных напряжений; σ_3 — величина инварианта нормальных напряжений; C_0 — величина инварианта сцепления.

Соотношение главных напряжений

$$\sigma_3 / \sigma_1 = \operatorname{tg}^2 (\pi / 4 - \varphi / 2).$$

Отношение инварианта сопротивления растяжению σ_3 к инварианту сопротивления сжатию σ_1 равно критическому отношению главных инвариантов напряжений $\Pi_{\kappa(\lambda)} = \sigma_3 / \sigma_1$, и не зависит от значения сцепления C_0 , т.е. является функцией угла внутреннего трения φ .

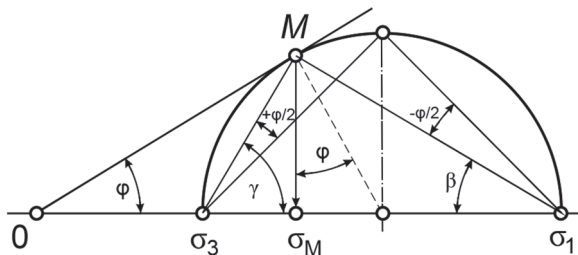


Рис. 5. Схема предельного состояния грунтов по теории Кулона-Мора
Fig. 5. Scheme of the limiting soil condition according to the theory Mohr-Coulomb

Такой подход дает возможность представить напряженно-деформированного состояния материала на основании обобщенной диаграммы Кулона–Мора (см. рис. 5).

Положение точки M (точки касания прямой OM) на диаграмме (рис. 5) соответствует эквивалентному значению нормального напряжения σ_M , которое определено условием предельного состояния, согласно синтетической теории прочности Е.И. Шемякина [16].

Оценку закономерностей деформационных процессов удобно производить в инвариантной форме, для этого экспериментальные деформационные диаграммы представляются в приведенной системе координат.

На рис. 6 приведена схема приведенного квадрата, где показана геометрическая связь угла внутреннего трения с положением критериальной точки A [X_A , Y_A] — параметра оценки уровня функциональной нелинейности [7], что позволяет установить связь:

$$\varphi = 2\arctg(1 - 2X_A) = 2\arctg(P_{K(л)}).$$

Отсюда соотношение углов площадок скольжения

$$\varphi = \gamma - \beta.$$

Таким образом физическая сущность угла внутреннего φ — это параметр функциональной нелинейности материалов [8, 12]. Поверхности (площадки) скольжения образуют с направлением большего главного напряжения угол β — независимо от значения сцепления. Положение поверхностей скольжения не зависит от величины внутреннего давления (C_0 — сцепления), что дает еще одно средство для оценки величины угла внутреннего трения материала с помощью деформационных испытаний. В частности, для того чтобы получить значение угла внутреннего трения для определенного типа песка, необходимо ввести между песчинками связующее вещество, обладающее нулевым внутренним трением (вода). Ее связующая сила C_0 в любом случае очень мала и определяется капиллярным давлением. Сцепление обусловлено гравитационным взаимодействием между частицами грунта, а влажность является основным фак-

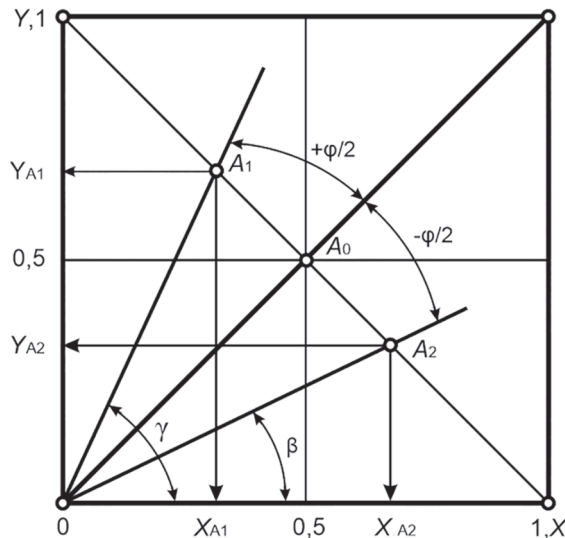


Рис. 6. Схема углов на площадках скольжения в приведенном квадрате

Fig. 6. Diagram of angles on the sliding sites in the reduced square

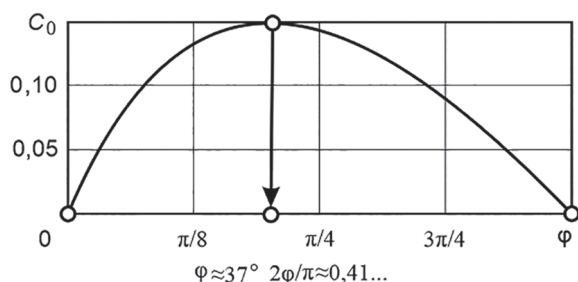


Рис. 7. Критерий инварианта сцепления (инвариант связности)
 Fig. 7. Criterion of coupling invariant (connectivity invariant)

тором, влияющим на конкретный массив грунта [18].

Буйсман [17] нашел для влажных песчаных призм при различной степени увлажнения приблизительно $\Pi_{к(л)} = 0,25$, при этом имеем

$$\sin\varphi = (1 - \Pi_{к(л)}) / (1 + \Pi_{к(л)}) = (1 - 0,25) / (1 + 0,25) = 0,6.$$

Значение угла внутреннего трения $\varphi = 36^{\circ}87'$ приводит к углу скольжения $\beta = 26^{\circ}56'$. Угол, образуемый плоскостью обрушения с осью призмы $\gamma = 63^{\circ}43'$, что было установлено экспериментально [17, 2].

Для торфов естественной структуры $\varphi = 25 - 15^{\circ}$ в зависимости от вида торфа и исходной влажности. Чем меньше коэффициент пористости грунта, тем больше угол внутреннего трения, который характеризует трение между частицами материала и в большей степени зависит от величины вертикального давления тела волочения [19].

Для построения, приближенного «паспорта прочности», вводят две численные характеристики условной прочности: угол внутреннего трения φ и сцепление C_0 . При этом с увеличением нагрузок «паспорт прочности» указывает [2] на возрастающее влияние трения при сдвиге материала и на уменьшающееся влияние сцепления C_0 .

Критерий инварианта сцепления C_0 [2] отражает возможный теоретический

предел величины угла внутреннего трения φ в области взаимного влияния показателей C_0 и φ . Данная зависимость $C_0 = f(\varphi)$ определена в неявном виде как совокупность ряда функционалов, при этом максимуму критерия инварианта сцепления C_0 соответствует угол внутреннего трения $\varphi = 36^{\circ}87'$ (рис. 7).

Предел текучести, т.е. то нормальное давление, в одноосном напряженном состоянии, при котором деформация начинает возрастать значительно быстрее, чем напряжение, часто не совпадает с пределами прочности или временным сопротивлением материала. Образующийся, таким образом, интервал на графике зависимости между напряжениями и сжатием соответствует пластическому поведению рассматриваемого материала. По достижении разрушения, т.е. когда силы сцепления преодолены, условие течения характеризует состояние отдельных частей образца [12].

В связных грунтах имеют место как вязкие, так и водно-коллоидные связи. Разделить эти сопротивления часто не представляется возможным. При $\varphi = 0^{\circ}$, критерий прочности Кулона–Мора превращается в критерий Треска, если $\varphi = 90^{\circ}$, то критерий прочности Кулона–Мора соответствует модели вязкой среды [20].

В табл. 2 приведены основные прочностные свойства ряда грунтов по данным СНиП и данные по торфу [4, 8],

Таблица 2

Основные прочностные свойства грунтов
Basic strength properties of soils

Вид грунта	Угол внутреннего трения $\varphi, ^\circ$	Параметр состояния, $P_{к(л)}$	Параметр состояния, $P_{к(н)}$	Критерий предельного состояния, K_p
Песок сухой	34	0,28	0,53	0,158
Песок влажный	40	0,22	0,47	0,141
Песок водонасыщенный	25	0,41	0,64	0,171 \rightarrow max
Гравий сухой	45	0,17	0,41	0,121
Гравий водонасыщенный	30	0,33	0,577	0,166
Глина сухая	25	0,41	0,64	0,171 \rightarrow max
Глина влажная	22	0,45	0,67	0,170
Глина водонасыщенная	15	0,59	0,77	0,152
Лесс	22	0,45	0,67	0,170
Суглинки	20	0,49	0,70	0,167
Верховой торф	40	0,25	0,50	0,166
Низинный торф	30	0,44	0,66	0,169

Примечание: расчетные формулы: $P_{к(л)} = \operatorname{tg}(0,25\pi - 0,5\varphi)$, $P_{к(н)} = P_{к(л)}^2$, $K_p = P_{к(л)}(1 - P_{к(л)}) / (1 + P_{к(л)})$.

дополненные параметрами состояния и критерием предельного состояния по теории дистортности [2]. В качестве инварианта параметра состояния структурной системы принимают соотношение действующих в некоторой точке образца главных напряжений в состоянии течения.

При этом отношение сопротивления растяжения к сопротивлению сжатию рано критическому отношению главных напряжений $P_k = \sigma_3 / \sigma_1$.

Направлению скольжения в некоторой точке пластической области соответствует критическое значение инварианта параметра состояния $P_k = 0,25$. Этому условию соответствует экспериментально установленный угол внутреннего трения $\varphi = 36^\circ 8'$. Данное условие соответствует критерию прочности Треска [20].

Следует отметить некоторые особенности применения теории дистортности в механике грунтов [2, 7]:

- геометрическое представление напряженно-деформированного состояния для различных материалов на основании обобщенной диаграммы Кулона-Мора;
- оценка поведения материала в за-предельном состоянии: когда главный сдвиг достигает предельной для данного тела величины, это значение сдвига в элементе среды сохраняется, а рост области необратимых деформаций и разрушения происходит только за счет увеличения их количества;
- определение остаточной прочности материала через вступление в работу других экстремальных площадок.

Заключение

Предлагаемая механическая модель эквивалента процесса сдвига слоя торфяной залежи при функционировании бульдозера должна учитывать основные структурно-механические характеристики сдвигаемого слоя торфяного сырья (паспорт прочности) с учетом предла-

гаемого предельного инварианта связности грунта согласно теории дистортности в механике торфа.

В качестве инварианта параметра состояния структурной системы принимается соотношение действующих в некоторой точке образца главных напряжений в состоянии течения материала при воздействии отвала бульдозера.

При этом отношение сопротивления растяжения к сопротивлению сжатию рано критическому отношению главных напряжений $P_k = \sigma_3 / \sigma_1$.

Особенности применения теории дистортности в механике грунтов:

- геометрическое представление напряженно-деформированного состояния материала на основании обобщенной диаграммы Кулона-Мора;
- оценка поведения материала в запредельном состоянии: когда главный сдвиг достигает предельной для данного материала величины при сохранении значение сдвига в элементе среды и росте необратимых деформаций только за счет увеличения их количества.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Михайлов А. В., Иванов С. Л., Габов В. В. Формирование и эффективное использование машинного парка торфодобывающих компаний // Вестник ПНИПУ. Геология. Нефтегазовое и горное дело. — 2015. — № 14. — С. 82–91. DOI: 10.15593/224-9923/2015.14.9.
2. Зюзин Б. Ф., Жигульская А. И., Юдин С. А. Дистортность в методологии взаимодействия технологических машин с торфяной залежью: монография. — Тверь: ТвГТУ, 2021. — 168 с.
3. Li B., Liu M., Sun P., Zang X. Research on the operation resistance of bulldozers based on joint simulation technology // Journal of Physics: Conference Series. 2023, vol. 2638, no. 1, article 012003. DOI: 10.1088/1742-6596/2638/1/012003.
4. Справочник по торфу / Под ред. А.В. Лазарева и С.С. Корчунова. — М.: Недра, 1982. — 760 с.
5. Михайлов А. В., Жигульская А. И., Казаков Ю. А. Рациональная технология комплексной разработки торфяных месторождений // Горная промышленность. — 2024. — № 1. DOI: 10.30686/1609-9192-2024-1-00-00.
6. Алиев М. М., Созонтова Е. А. Представление обобщенного критерия прочности Кулона-Мора для анизотропных пород в системе координат Хейга-Вестергаарда // Горный информационно-аналитический бюллетень. — 2025. — № 3. — С. 42–53. DOI: 10.25018/0236_1493_2025_3_0_42.
7. Зюзин Б. Ф., Жигульская А. И. Дистортность в процессах торфяного производства: монография, в 2-х ч. Ч. I. — Тверь: ТвГТУ, 2024. — 160 с.
8. Амарян Л. С. Свойства слабых грунтов и методы их изучения. — М.: Недра, 1990. — 220 с.
9. Баловнев В. И. Подobie и моделирование в системе проектирования дорожно-строительных машин. — М.: МАДИ, 2014. — 148 с.
10. Баловнев В. И. Определение оптимальных параметров и выбор землеройных машин в зависимости от условий эксплуатации. — М.: МАДИ (ГТУ). 2010. — 134 с.
11. Базин Е. Т., Копенкин В. Д., Косов В. И. Технический анализ торфа. — М.: Недра, 1992. — 431 с.
12. Карасев Г. Н. Определение силы резания грунта с учетом упругих деформаций при разрушении // Строительные и дорожные машины. — 2008. — № 4. — С. 36–42.
13. Mikhailov A. V., Zyuzin B. E., Zhigulskaya A. I. Models for representing limit states in geomechanics // Journal of Physics: Conference Series. 2021, vol. 1753, no. 1, article 012034. DOI: 10.1088/1742-6596/1753/1/012034.
14. Sibille L. Géotechnique pour le technicien IUT Génie Civil et Construction Durable Module MXG5. Licence. France. 2018. cel-01784592. 62 p.
15. Сенашов С., Непершин Р. Предельное состояние деформированных тел и горных пород. — М.: Физматлит, 2008. — 833 с.

16. Шемякин Е. И. Об инвариантах напряженного и деформированного состояния в математических моделях механики сплошной среды / Современные проблемы прочности, пластичности и устойчивости. — Тверь: ТвГТУ, 2007. — С. 42—46.
17. Buismán A. S. K. Results of long duration settlement tests / Proceedings 1st International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, Cambridge, Mass, 1936, pp. 103—106.
18. Han Z., Li J., Gao P., Huang B., Ni J., Wei C. Determining the shear strength and permeability of soils for engineering of new paddy field construction in a Hilly Mountainous Region of Southwestern China // International Journal of Environmental Research and Public Health. 2020, vol. 17, no. 5, article 1555. DOI: 10.3390/ijerph17051555.
19. Yusoff S. A. N. M., Bakar I., Wijeyesekera D. C., Zainorabidin A., Madun A. Comparison of geotechnical properties of laterite, kaolin and peat // Applied Mechanics and Material. 2015, vol. 773—774, pp. 1438—1442. DOI: 10.4028/www.scientific.net/AMM.773-774.1438.
20. Atkinson J. The mechanics of soils and foundations. 2nd ed. London CRC Press, 2017, 480 p. DOI: 10.1201/978131527354. **ТМБ**

REFERENCES

1. Mikhailov A. V., Ivanov S. L., Gabov V. V. Creation and efficient operation of machine fleet in peat-processing companies. *Perm journal of petroleum and mining engineering*. 2015, no. 14, pp. 82—91. [In Russ]. DOI: 10.15593/224-9923/2015.14.9.
2. Zyuzin B. F., Zhigul'skaya A. I., Yudin S. A. *Distortnost' v metodologii vzaimodeystviya tekhnologicheskikh mashin s torfyanoy zalezhyu: monografiya* [Distortion in the methodology of interaction between technological machines and peat deposits: monograph], Tver, 2021, 168 p.
3. Li B., Liu M., Sun P., Zang X. Research on the operation resistance of bulldozers based on joint simulation technology. *Journal of Physics: Conference Series*. 2023, vol. 2638, no. 1, article 012003. DOI: 10.1088/1742-6596/2638/1/012003.
4. *Spravochnik po torfu*. Pod red. A.V. Lazareva, S.S. Korchunova [Handbook of peat. Lazarev A. V., Korchunov S. S. (Eds.)], Moscow, Nedra, 1982, 760 p.
5. Mikhailov A. V., Zhigul'skaya A. I., Kazakov Yu.A. Rational technology for integrated mining of peat deposits. *Russian Mining Industry Journal*. 2024, no. 1. [In Russ]. DOI: 10.30686/1609-9192-2024-1-00-00.
6. Aliev M. M., Sozontova E. A. Representation of the generalized Mohr–Coulomb failure criterion of anisotropic rocks in the Haigh–Westergaard stress space. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2025, no. 3, pp. 42—53. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236_1493_2025_3_0_42.
7. Zyuzin B. F., Zhigul'skaya A. I. *Distortnost' v protsessakh torfyanogo proizvodstva: monografiya*. Ch. I. [Distortion in the processes of peat production: monograph. Part I], Tver, 2024, 160 p.
8. Amaryan L. S. *Svoystva slabyykh gruntov i metody ikh izucheniya* [Properties of weak soils and methods for their study], Moscow, Nedra, 1990, 220 p.
9. Balovnev V. I. *Podobie i modelirovanie v sisteme proektirovaniya dorozhno-stroitel'nykh mashin* [Similarity and modeling in the system of road construction machinery design], Moscow, 2014, 148 p.
10. Balovnev V. I. *Opredelenie optimal'nykh parametrov i vybor zemleroynykh mashin v zavisimosti ot usloviy ekspluatatsii* [Determination of optimal parameters and selection of earthmoving machines depending on operating conditions], Moscow, 2010, 134 p.
11. Bazin E. T., Kopenkin V. D., Kosov V. I. *Tekhnicheskii analiz torfa* [Technical analysis of peat], Moscow, Nedra, 1992, 431 p.
12. Karasev G. N. Determination of the cutting force of soil, taking into account elastic deformations during destruction. *Construction and road building machinery*. 2008, no. 4, pp. 36—42. [In Russ].
13. Mikhailov A. V., Zyuzin B. E., Zhigul'skaya A. I. Models for representing limit states in geomechanics. *Journal of Physics: Conference Series*. 2021, vol. 1753, no. 1, article 012034. DOI: 10.1088/1742-6596/1753/1/012034.
14. Sibille L. *Géotechnique pour le technicien IUT Génie Civil et Construction Durable Module MXG5*. Licence. France. 2018. cel-01784592. 62 p.
15. Senashov S., Nepershin R. *Predel'noe sostoyanie deformirovannykh tel i gornyykh porod* [Limit state of deformed bodies and rock], Moscow, Fizmatlit, 2008, 833 p.

16. Shemyakin E. I. On invariants of stress and strain states in mathematical models of continuum mechanics. *Sovremennye problemy prochnosti, plastichnosti i ustoychivosti* [Modern problems of strength, plasticity and stability], Tver, 2007, pp. 42 – 46.

17. Buisman A. S. K. Results of long duration settlement tests. *Proceedings 1st International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering*, Cambridge, Mass, 1936, pp. 103 – 106.

18. Han Z., Li J., Gao P., Huang B., Ni J., Wei C. Determining the shear strength and permeability of soils for engineering of new paddy field construction in a Hilly Mountainous Region of Southwestern China. *International Journal of Environmental Research and Public Health*. 2020, vol. 17, no. 5, article 1555. DOI: 10.3390/ijerph17051555.

19. Yusoff S. A. N. M., Bakar I., Wijeyesekera D. C., Zainorabidin A., Madun A. Comparison of geotechnical properties of laterite, kaolin and peat. *Applied Mechanics and Material*. 2015, vol. 773 – 774, pp. 1438 – 1442. DOI: 10.4028/www.scientific.net/AMM.773-774.1438.

20. Atkinson J. *The mechanics of soils and foundations*. 2nd ed. London CRC Press, 2017, 480 p. DOI: 10.1201/978131527354.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Зюзин Борис Федорович¹ – д-р техн. наук, профессор,
зав. кафедрой, e-mail: zbfriu@yandex.ru,
ORCID ID: 0000-0002-8344-3047,

Жигульская Александра Ивановна¹ – канд. техн. наук,
доцент, доцент, e-mail: 9051963@gmail.com,
ORCID ID: 0000-0003-4350-7314,

¹ Тверской государственный технический университет.

Для контактов: Жигульская А.И., e-mail: 9051963@gmail.com.

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

B.F. Zyuzin¹, Dr. Sci. (Eng.), Professor,
Head of Chair, e-mail: zbfriu@yandex.ru,
ORCID ID: 0000-0002-8344-3047,

A.I. Zhigul'skaya¹, Cand. Sci. (Eng.),
Assistant Professor, Assistant Professor,
e-mail: 9051963@gmail.com,

ORCID ID: 0000-0003-4350-7314,

¹ Tver State Technical University, 170026, Tver, Russia.

Corresponding author: A.I. Zhigul'skaya, e-mail: 9051963@gmail.com.

Получена редакцией 05.08.2025; получена после рецензии 20.10.2025; принята к печати 17.11.2025.

Received by the editors 05.08.2025; received after the review 20.10.2025; accepted for printing 17.11.2025.

