УДК 622.271:622.331:621.879

Якупов Дмитрий Радикович, аспирант
(Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II, г. Санкт-Петербург)
Dmitrii Radikovich Iakupov, postgraduate student
(Saint Petersburg Mining University of Empress Catherine II, Saint Petersburg)

ИССЛЕДОВАНИЕ УСИЛИЯ ВНЕДРЕНИЯ КОВШОВЫХ РАБОЧИХ ОРГАНОМ В НЕОСУШЕННУЮ ТОРФЯНУЮ ЗАЛЕЖЬ

INVESTIGATION OF THE PENETRATION FORCE OF BUCKET-TYPE WORKING TOOLS INTO UNDRAINED PEAT DEPOSITS

Аннотация. Проведен анализ механизма взаимодействия и моделей расчета усилия внедрения ковшовых рабочих органов в неосушенную торфяную залежь. Систематизированы схемы взаимодействия с массивом, оценены модели Сагомоняна, Зеленина и Кулона — Мора, намечены пути их адаптации.

Abstract. An analysis has been conducted on the interaction mechanism and calculation models for the penetration force of bucket-type working implements into undrained peat deposits. The various modes of interaction with the peat mass have been systematized, the models proposed by Sagomonyan, Zelenin, and Coulomb–Mohr have been evaluated, and potential approaches for their adaptation have been outlined.

Введение

Организация добычи торфа без осушения с помощью комплексов на мостовых платформах сталкивается с серьезной проблемой: высокое лобовое сопротивление неосушенной залежи копанию. Поскольку массив не обезвожен, торф обладает высокой вязкостью, липкостью и гидростатическим давлением, что резко увеличивает энергоемкость разрушения и нагрузки на рабочие органы машин. [1,3].

Ключевым процессом, определяющим энергоемкость экскавации, выбор параметров гидропривода и динамическую загрузку рабочего оборудования мостового комплекса, является отделение порции торфа от монолита забоя, начинающееся с первоначального проникания (внедрения) режущего периметра ковша в неподготовленный массив. Неосушенная торфяная залежь представляет собой высокопористую двухфазную органогенную среду, физико-механические свойства которой существенно отличаются от традиционных минеральных грунтов. В связи с этим прямолинейный перенос классических формул землеройного машиностроения ве-

дет к существенным ошибкам при расчете силовых характеристик. Целью настоящей работы является систематизация и аналитический анализ теоретических подходов к определению усилия внедрения рабочих органов в неосушенный торфяной массив [2,8].

Физико-механические особенности залежи как среды внедрения

Физико-механическое состояние неосушенной торфяной залежи определяется ее естественным водонасыщением (влажность W=88–98%), высокой сжимаемостью и выраженной пространственной анизотропией прочностных свойств по глубине выемочного уступа. В верхнем дерновом слое (очесе) органогенный каркас сформирован переплетением неразложившихся растительных волокон (преимущественно Sphagnum magellanicum), выполняющих функцию естественного армирующего мата с пределом прочности на сдвиг $\tau_{крит}$=8–12 кПа. С увеличением глубины залегания степень разложения R возрастает от 5–15% до 40–55%, что сопровождается трансформацией волокнистой структуры в пластичную гумифицированную массу [4,7].

Для математической оценки силы лобового сопротивления прониканию и пенетрации режущих элементов (зубьев, ножей, ковшовых кромок) по глубине забоя используется показатель удельного сопротивления статическому зондированию q, значение которого для естественных торфяных массивов варьируется в диапазоне от 60 до 280 кПа. Существенным усложняющим фактором при внедрении инструмента является пнистость залежи — наличие погребенной древесины. Объемное содержание древесных включений в верховых залежах составляет 1,3–3,5% (до 5,0% в лесных подтипах), а в низинных месторождениях достигает 10–12% при среднем диаметре пней 0,3–0,6 м [5, 10, 11].

Анализ фундаментальных моделей внедрения и резания

Для математического описания усилия внедрения выемочных элементов в неосушенный органогенный массив привлекаются три базовых теоретических подхода, описывающих динамику проникания, механику послойного резания и условия предельного равновесия водонасыщенной среды.

Для анализа локального пробивания и проникания заостренных элементов в сжимаемые пластические среды используется фундаментальная модель А.Я. Сагомоняна, в которой суммарная сила сопротивления прониканию заостренного конуса Fк выражается суммой статической, динамической и инерционной составляющих по формуле 1 [9].

$$\mathrm{F_к} = \varkappa\left\{A_1 + \frac{1}{2}\rho_0 v^2 B_1 + \rho_0 w H C1\right\}\pi H^2 \tan^2\beta, \qquad (1)$$

где $F_к$ – полная суммарная сила сопротивления прониканию заостренного конуса в массив, Н; $\varkappa$ – коэффициент, учитывающий влияние су-

хого трения скольжения грунта о боковую поверхность проникающего конуса; A_1 – статический коэффициент прочности среды, определяемый пределом прочности и удельным сцеплением массива; ρ_0 – начальная плотность невозмущенной торфяной залежи, кг/м^3; v – текущая скорость проникания вершины конуса в забой, м/с; B_1 – динамический коэффициент инерционного сопротивления сжатию и отжиманию массы; w – текущее ускорение (или замедление) проникающего конуса, м/с^2; H – текущая глубина погружения вершины конуса в массив, м; C_1 – коэффициент присоединенной массы среды при неустановившемся внедрении; β – угол полураствора (половина угла заострения) конуса, рад.

Уравнение А.Я. Сагомоняна показывает, что силовая загрузка определяется статической прочностью каркаса, динамическим отпором среды, пропорциональным квадрату скорости v^2, и инерцией присоединенной водонасыщенной массы при ускоренном внедрении.

Для теоретико-эмпирического расчета силы послойного резания и внедрения элементарных профилей применяется нелинейная зависимость А.Н. Зеленина по формуле 2 [6].

.

$$P = 10Ch^{1,35}(1 + 0{,}1s)\left(1 - \frac{90° - \alpha}{180°}\right)V, \qquad (2)$$

где P – полная горизонтальная сила (сопротивление) резания грунта элементарным профилем, Н; C – число ударов динамического плотномера ДарНИИ с площадью наконечника 1 см^2, характеризующее категорию прочности и труднопрорабатываемость грунта; h – глубина резания, см; s – толщина элементарного режущего профиля, см; α – угол резания инструмента (30–90°), град; V – поправочный коэффициент, учитывающий влияние угла заострения фаски лезвия.

Модель Зеленина отражает степенную зависимость усилия от глубины, однако показатель C разработан для минеральных грунтов и не учитывает волокнистую анизотропию торфа, отжим поровой влаги и изменение прочности по глубине выемочного уступа.

Сопротивление торфяного массива сдвигу при внедрении стенок и кромок ковша подчиняется условию предельного равновесия Кулона — Мора с учетом принципа эффективных напряжений К. Терцаги [12]:

$$\tau = C_0 + \sigma \tan\varphi = C_0 + (\sigma - u)\tan\varphi, \qquad (2)$$

где τ – предельное касательное напряжение, Па; C_0 – удельное структурное сцепление массива, Па; σ – полное нормальное контактное напряжение, действующее перпендикулярно площадке сдвига, Па; φ – угол

внутреннего трения, рад; *и* – избыточное поровое давление жидкой (водной) фазы в порах среды, Па.

При динамическом внедрении лезвия в межчелюстном пространстве ковша возникают пики избыточного порового давления. Высокое поровое давление локально снижает эффективное напряжение, уменьшая сопротивление сдвигу непосредственно при резании, но вызывает гидродинамический отпор при уплотнении и заполнении емкости.

5. Геометрические, трибологические и динамические факторы усилия внедрения

Геометрия режущей кромки с рациональным углом заострения лезвия β=20–30° совместно с углом резания α=20–35° снижает лобовое сопротивление смятию органогенного скелета в 1,8–2,4 раза по сравнению с тупыми профилями за счет устранения уплотненного ядра перед режущей кромкой. Задний угол $\alpha_{зад}$=5–10° предотвращает трение задней грани об обработанный забой. Наклонный или криволинейный профиль кромки (по логарифмической спирали) обеспечивает скользящий срез моховых волокон, снижая суммарное сопротивление на 25–40%.

С точки зрения трибологических эффектов и липкости, при малых скоростях внедрения проявляются силы молекулярной и капиллярной адгезии с удельной липкостью от 2,5 до 4,5 кПа. Однако при динамическом сдвиге и сжатии торфомассы происходят выпрессовывание свободной воды и формирование на границе «сталь — торф» сплошной жидкостной пленки. Это переводит трение в режим гидродинамической смазки, снижая коэффициент трения скольжения μ до 0,15–0,25.

Динамические пиковые нагрузки от пнистости возникают при столкновении режущей кромки с погребенными древесными включениями диаметром 0,3–0,6 м приводит к жесткому заклиниванию инструмента и возникновению пиковых динамических нагрузок, превышающих номинальное усилие внедрения и копания в 3,5–6,0 раз. Данный фактор требует применения специальных ножей-щекеров для перерезания древесины и ввода динамических коэффициентов запаса в гидропривод.

Заключение

Проведенный анализ показывает, что традиционные модели резания и проникания грунтов (А.Н. Зеленина, А.Я. Сагомоняна) требуют существенной адаптации к специфическим физико-механическим условиям неосушенной торфяной залежи. Для точного определения усилия внедрения ковшовых рабочих органов необходима разработка интегральной математической модели, комплексно учитывающей: пространственную анизотропию сдвиговой прочности торфяного массива по глубине выемочного уступа; динамическое перераспределение порового давления воды и принцип эффективных напряжений К. Терцаги в зоне резания; влияние геометрии инструмента (углов заострения, резания и профиля кромки) на сниже-

ние лобового сопротивления смятию; вероятностный фактор столкновения с древесными включениями и сопутствующие пиковые нагрузки.

Список литературы

1. Валиев Н.Г. Гидромеханизированный способ добычи торфа: современное состояние и перспективы / Н.Г. Валиев, Н.В. Гревцев, М.С. Лебзин // Известия Тульского государственного университета. Науки о Земле. – 2020. – № 4. – С. 141–150.
2. Великанов В.С. Прогнозирование нагруженности рабочего оборудования карьерного экскаватора по нечетко-логистической модели / В.С. Великанов // Записки Горного института. – 2020. – Т. 241. – С. 29–36. – DOI: 10.31897/PMI.2020.1.29.
3. Горячев В.И. Выбор пресса для обезвоживания торфа в технологии фракционирования торфяного сырья гидроразмывом / В.И. Горячев, И.И. Михеев, А.Л. Яблонев, К.В. Фомин // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2018. – № S38. – С. 22–30. – DOI: 10.25018/0236-1493-2018-7-38-22-30.
4. Заровняев Б.Н. Перспективы освоения месторождений торфа Арктических и Субарктических районов России / Б.Н. Заровняев, В.Ф. Попов, Г.В.
5. Шубин [и др.] // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2020. – № 6. – С. 168–177. – DOI: 10.25018/0236-1493-2020-6-0-168-177.
6. Зеленин А.Н. Физические основы теории резания грунтов / А.Н. Зеленин. — Москва ; Ленинград : Изд-во АН СССР, 1950. — 354 с.
7. Корчунов С.С. Зависимость механической прочности торфа от влажности / С.С. Корчунов // Торфяная промышленность. — 1948. — № 3. — С. 16–19.
8. Крамаренко В.В. Классифицирование торфов по чувствительности к механическим техногенным воздействиям / В.В. Крамаренко, В.Ю. Молоков // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2024. – Т. 335, № 12. – С. 231–243.
9. Сагомонян А.Я. Проникание твердых тел в сжимаемые сплошные среды / А.Я. Сагомонян. — Москва : Изд-во МГУ, 1974. — 299 с. Федоров Д.И. Рабочие органы землеройных машин / Д.И. Федоров. — Москва : Машиностроение, 1977. — 288 с.
10. Фомин К.В. Методика оценки спектральной плотности момента сопротивления на рабочем органе торфяного фрезерующего агрегата / К.В. Фомин // Записки Горного института. – 2020. – Т. 241. – С. 58–67. – DOI: 10.31897/PMI.2020.1.58.
11. Шрейнер Л.А. Физические основы механики горных пород / Л.А. Шрейнер. — Москва : Гостоптехиздат, 1950. — 212 с.
12. Яблонев А.Л. Деформирование торфяной залежи штампами и ходовыми устройствами машин в свете общей теории механики грунтов / А.Л. Яблонев, А.Ю. Скориков // Труды Инсторфа. — 2015. — № 12 (65). — С. 33–40.