

ФИЗИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ СОПРОТИВЛЕНИЯ ПЕРЕМЕЩЕНИЮ ГРУЗОВ ПО ПОВЕРХНОСТИ ТОРФЯНОГО МЕСТОРОЖДЕНИЯ НА СТЕНДЕ

Д. Р. Якупов¹, П. В. Иванова¹, С. Л. Иванов¹

¹ Санкт-Петербургский горный университет, Санкт-Петербург, Россия

Аннотация: Рассмотрен вопрос о сопротивлении при перемещении нагруженной платформы по натуральной торфяной залежи. Приведен анализ сил сопротивления, которые действуют на платформу при ее перемещении по поверхности обводненного торфяного месторождения. Приведена схема сил, действующих на платформу при ее перемещении по натуральному торфяному месторождению. Учтены силы сопротивления движению платформы при перемещении по поверхности натуральной торфяной залежи, сила Архимеда, вес платформы с размещенным на ней грузом. Анализируются составляющие сил сопротивления и факторы, от которых они зависят. Даны результаты натурных экспериментов по перемещению модели по поверхности натуральной торфяной залежи. Приводится зависимость силы сопротивления перемещению от давления на поверхность торфяного месторождения, а также зависимость для оценки тягового усилия перемещения модели по торфяному месторождению. Разработан стенд для детального анализа закономерностей влияния угла фронтальной части перемещаемой платформы, фрикционных свойств соприкасающихся поверхностей. Модель, собранная для физического моделирования, имеет возможность детерминированного изменения веса, угла фронтальной части платформы, фрикционных свойств поверхностей трения. Приводится сравнение результатов аналогичных экспериментов на реальном торфяном месторождении и на стенде для оценки адекватности тенденций физического моделирования. Приведены результаты экспериментальных исследований влияния угла фронтальной части модели на силу сопротивления. Построены графические зависимости силы тяги от давления на поверхность для пяти углов фронтальной части модели передвигаемой платформы. Даны рекомендации по снижению силы сопротивления движению платформы путем оптимального выбора угла фронтальной части платформы.

Ключевые слова: торф, торфяное сырье, торфяное месторождение, натуральная торфяная залежь, стенд, физическое моделирование, заболоченная местность, перемещение груза, преодоление болот, сопротивление перемещению, моделирование, модель, эксперимент.

Для цитирования: Якупов Д. Р., Иванова П. В., Иванов С. Л. Физическое моделирование сопротивления перемещению грузов по поверхности торфяного месторождения на стенде // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2021. – № 5–1. – С. 117–129. DOI: 10.25018/0236_1493_2021_51_0_117.

Physical simulation of load displacement resistance of peat land surface on test bench

D. R. Yakupov¹, P. V. Ivanova¹, S. L. Ivanov¹

¹ Saint Petersburg Mining University, Saint Petersburg, Russia

Abstract: This article addresses resistance to displacement of loaded platform over the surface of natural peat land. We present the analysis of resistance forces applied to the platform during its displacement over the surface of water-flooded peat land. The diagram of forces affecting the moving platform on the surface of natural peat land is given. The resistance forces are added with the Archimedean force and the weights of the load and platform. The resistance forces and their generation factors are analyzed. The full-scale test data on displacement of a model over the natural peat land surface are presented. The relationship of the displacement resistance on the pressure applied to the peat land surface, as well as the dependence to estimate the required traction force to displace the platform are given. The test bench is designed for the detailed analysis of the platform front angle and friction properties of contacting surfaces. The physical simulation model allows deterministic variation in the platform weight, platform front angle and friction properties of contacting surfaces. The full-scale test results are compared with the test bench simulation data for the physical simulation relevance evaluation. The experimental data on the influence of the model platform front angle on the platform displacement resistance are presented. The traction force versus the peat land surface pressure is plotted for five values of the model platform front angle. The recommendations on reduction of the platform displacement resistance by selecting the optimized angle of the platform front are given.

Key words: peat, peat raw material, peat land, natural peat bed, test bench, physical simulation, inundated land, load displacement, bog crossing, displacement resistance, modeling, model, experiment.

For citation: Yakupov D. R., Ivanova P. V., Ivanov S. L. Physical simulation of load displacement resistance of peat land surface on test bench. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2021;(5–1):117–129. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236_1493_2021_51_0_117.

Введение

Торф представляет собой биоресурс, который находит свое применение в первую очередь в энергетической отрасли, также широко используется в сельском хозяйстве, медицине, животноводстве и строительстве. Доступность и меньшая себестоимость по сравнению с углем делает торф эффективным для использования в качестве местного топлива, позволяющего обеспечить энергией труднодоступные территории [1, 2].

Одним из направлений Энергетической стратегии России до 2035 года является развитие технологий, повышающих экологичность производства, что делает актуальным работу над оборудованием для осуществления добычи торфа в рамках климатосберегающих технологий [3]. Наибольший вред окружающей среде наносят операции по водопонижению, необходимые

для традиционных способов добычи торфа, таких как фрезерный метод по поверхностно-послойной стратегии. Более того, организация полей сушки требует больших площадей, а также может приводить к лесным пожарам, что делает актуальным наличие блока предварительной переработки торфяного сырья для подготовки к транспортировке добываемого торфа [4–7].

Вследствие этих факторов современные способы добычи торфа разрабатываются таким образом, чтобы была возможность ведения добычи из обводненной залежи, а торфяное сырье транспортировалось после операции обезвоживания в блоке предварительной переработки. Одним из решений для возможности ведения добычных работ на обводненной залежи является применение передвигаемых плавучих платформ, где размещается необходимое горное оборудование [8–11].

Так как в процессе добычи платформу с оборудованием, имеющую значительный вес, будут перемещать по торфяному месторождению, то необходимо провести анализ сил сопротивления для минимизации энергозатрат на данные операции.

Силы сопротивления при перемещении платформы

В процессе перемещения платформы с размещенным на ней горным оборудованием по торфяному месторождению на нее будут действовать несколько сил, показанных на рис. 1, где P_1 — сила сопротивления деформированию поверхностного слоя торфяного месторождения при движении платформы; P_2 — сила сопротивления фронтальной части платформы при движении по деформируемому слою поверхности торфяного месторождения; P_3 — сила Архимеда; P_4 — сила сопротивления перемещению по поверхности торфяного месторождения. Сила сопротивления P_4 является результирующей, она включает в себя сопротивления, возникающие, в первую очередь, в области донной части, а также менее значимые сопротивления перемещению на тыльной и боковых сторонах платформы при ее перемещении. На данном рисунке также

представлены: T — сила тяги, необходимая для перемещения платформы; Q — суммарный вес платформы; N — результирующая реакция поверхности от воздействия на нее веса Q [12–14].

Сила сопротивления P_1 является результирующей и зависит от свойств поверхности торфяного месторождения, она определяется как значениями параметров этой поверхности, а также степенью погружения H модели и углом α фронтальной поверхности платформы. Силы сопротивления P_2 и P_4 зависят от структуры торфяного месторождения, влаги других условий, а величина данных сил определяется в основном фрикционными свойствами контактирующих поверхностей. Материал донной части платформы должен выполняться износостойким и антикоррозийным, а также обеспечивать низкий коэффициент трения. Так как месторождение обводнено, то в определенный момент на платформу начинает действовать сила Архимеда [15–18].

Сила тяги T , необходимая для перемещения платформы, равна векторной сумме выше указанных сил [19, 20]:

$$\begin{aligned} T &= P_1 \sin \alpha + P_2 \cos \alpha + P_4 = \\ &= L(F_{p1} \sin \alpha + F_{p2} k \cos \alpha) + \\ &= C(Q - \rho g V)k, \end{aligned} \quad (1)$$

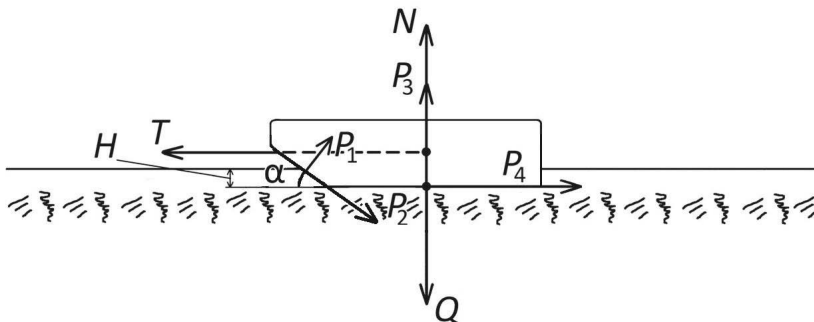


Рис. 1. Действие сил на платформу в процессе перемещения по поверхности торфяной залежи

Fig. 1. Forces that are applied to the platform during its movement over the peat deposit surface

где L — длина фронта, Fp_1 — удельная сила сопротивления деформации поверхности, Fp_2 — удельная сила сопротивления трения носовой части платформы, k — коэффициент сопротивления движения, C — эмпирический коэффициент учета сил сопротивления движению, при этом $C > 1$, V — объем вытесненной воды, Q — сила веса, — плотность воды.

Так как платформа, нагруженная горным оборудованием, будет иметь значительную массу, это неизбежно погрузит ее в поверхность торфяного месторождения на определенную величину, что увеличит сопротивление перемещению из-за лобового сопротивления. Изменение угла фронтальной части должно помочь снизить данное сопротивление, так как платформа будет плавно уплотнять поверхность торфяного месторождения. Для экспериментальной оценки влияния угла фронтальной части платформы необходимо создать стенд для физического моделирования.

Физическое моделирование процесса перемещения

Физическое моделирование основывается на теории подобия и анализе размерностей. Основными условиями возможности проведения физического моделирования являются геометрическое подобие, представляющего собой подобие формы природы и модели, а также физическое подобие, означающее, что переменные во времени величины, которые характеризуют исследуемое явление, должны быть пропорциональны для модели. При соблюдении данных условий значения, получаемые экспериментально, будут соответствовать реальному протеканию явления, появится возможность переноса на природу за счет умножения каждой величины на коэффициент подобия [21].

Физическое моделирование дает возможность проведения эксперимента в малом масштабе, что существенно снижает материальные затраты на проведение исследований. Путем физического моделирования при соблюдении физического и геометрического подобия становится возможным исследование зависимостей между переменными, например, для создания или оптимизации оборудования, применяемого в исследуемом процессе [22, 23].

Таким образом, для создания экспериментального стенда необходимо выполнить условия геометрического и физического подобия. Для того, чтобы проверить, выполняется ли физическое подобие, нужно сравнить физические зависимости, полученные на реальном месторождении и на стенде.

Экспериментальные исследования на реальном месторождении

Экспериментальные исследования проводились на торфяном месторождении верхового типа Гладкое Ленинградской области. В качестве модели была использована пластиковая емкость с постоянным объемом $12 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3$. Вес модели пошагово изменялся путем наполнения водой от 10 Н до 120 Н. Размеры модели составляли $0,3 \times 0,2 \times 0,18 \text{ м}$. Угол фронтальной части модели составлял 90° . Сила тяги, необходимая для перемещения, измерялась с помощью динамометра Energy BEZ-151A с ценой деления 0,5 Н. Также в данном эксперименте измерялась степень погружения модели в поверхность торфяного месторождения с помощью линейки диапазоном 300 мм.

Также была проведена оценка некоторых физических свойств поверхностного растительного покрова. По методике, подобной ГОСТ 409 — 77,

была оценена кажущаяся плотность поверхностного растительного покрова торфяной залежи из живых и отмерших мхов и трав, еще не затронутого оторфованием с учетом величины поверхностных вод, выступающих под штампом при его воздействии на исследуемую поверхность, которая составила 27 ± 4 кг/м³. Подобно методике ГОСТ 26605 – 93, была проведена оценка напряжения при сжатии поверхностного растительного покрова, которая составила $2,0 \pm 5$ кПа. Оценка приводилась при помощи штампа заданных размеров и веса.

Для оценки влияния заглубления модели в поверхность месторождения эксперимент проводился по двум типам поверхности: по жесткому основанию с трибологическими свойствами поверхности натуральной залежи и по натуральной торфяной залежи [24]. Здесь под термином натуральная торфяная залежь понимается естественное напластование отдельных видов торфа от поверхности до минерального дна торфяного месторождения, имеющее торфогенный слой и поверхностный растительный покров из живых и отмерших мхов и трав, еще не затронутый оторфованием, характеризующийся в своих естественных границах избыточным увлажнением и не подвергнутый осушению. А под понятием «жесткое основание с трибологическими свойствами поверхности натуральной залежи» имеется в виду искусственно сформированная практически не деформируемая поверхность при скольжении, по которой коэффициент сопротивления движению равен коэффициенту трения скольжения.

В результате эксперимента был построен график изменения силы тяги в зависимости от давления модели платформы на поверхность (рис. 2). Результаты эксперимента были обра-

ботаны и аппроксимированы для будущего сравнения с экспериментальными данными, полученными на стенде.

Создание стенда для физического моделирования

В рамках эксперимента, описанного выше, было недостаточно исследовано влияние на силу трения материалов, вступающих в контакт с торфяным месторождением. Также используемая модель не давала возможности оценить степень влияния угла фронтальной части платформы на силу сопротивления передвижению. Путем создания стенда для исследований данных зависимостей могут быть получены необходимые данные для нахождения оптимального материала и угла наклона фронтальной части платформы.

Для создания стенда необходимо смоделировать торфяное месторождение. Болотная растительность имеет упругую структуру, а также негладкую поверхность. В качестве модели верхнего слоя торфяного месторождения выбран поролон марки HR 3018. Его физические параметры: кажущаяся плотность $30 \pm 0,9$ кг/м³; напряжение при сжатии на 40 % $1,9 - 2,4$ кПа; относительная остаточная деформация при 20 С° и 50 % сжатии через 72 ч – 5 %; прочность при растяжении – 115 кПа; относительное удлинение при разрыве – 139 %; коэффициент упругости – 76 %; эластичность по отскоку – 39 %. Упругость и негладкая поверхность такой искусственной поверхности обладают близкими физическими параметрами к поверхности торфяного месторождения, моделируя свойства деформируемой опоры. Поролон разной толщины позволяет изучать различные сценарии перемещения платформы на торфяном месторождении. В качестве модели передвижаемой платформы с добыва-

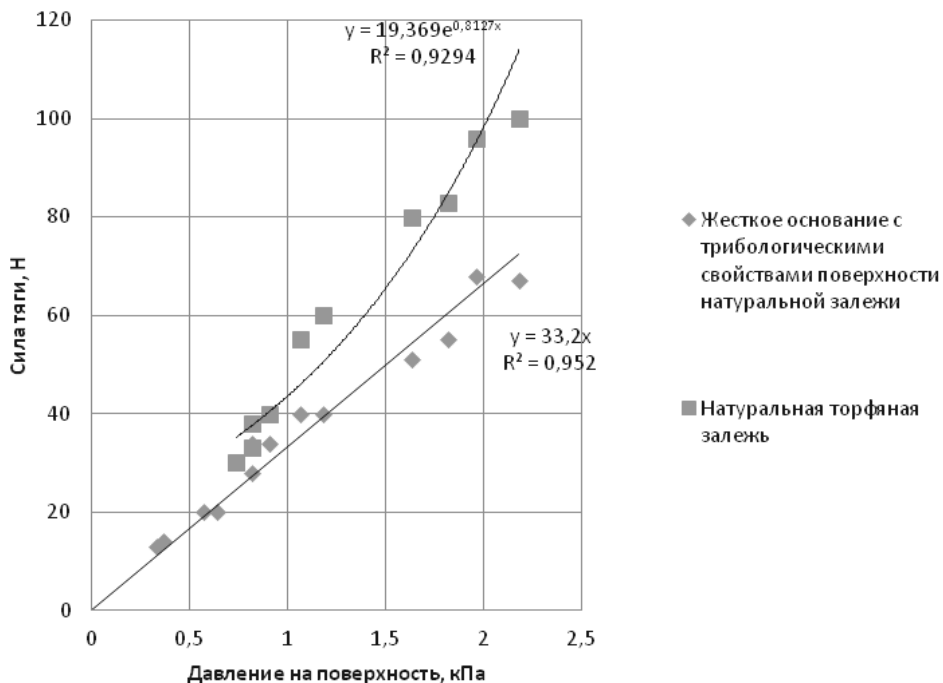


Рис. 2. Изменение силы тяги в зависимости от давления модели платформы на поверхность

Fig. 2. Traction force changes depending on the pressure applied to the surface by the platform model

ющим оборудованием использована деревянная конструкция, имеющая возможность смены угла фронтальной части с помощью винтового механизма. Также данная конструкция предполагает возможность смены материала донной и фронтальной поверхностей, соприкасающихся с моделью торфяного месторождения, путем прикручивания сменных пластин из металла, пластика и других материалов, уместных для применения в изготовлении реальной платформы.

Таким образом, благодаря разработанному стенду (рис. 3) появилась возможность изучения физических взаимодействий торфяного месторождения с передвигаемой платформой при различных условиях: при изменении угла фронтальной части модели платформы,

материалов донной и фронтальной части модели платформы, а также варьировании толщины слоя деформируемой опоры. Помимо этого, стенд обладает возможностью изменения давления путем изменения веса модели.

Экспериментальные исследования на стенде

Экспериментальная установка включает в себя деревянную модель с переменным весом, изменение которого возможно путем навешивания грузовых блинов, размеры модели 0,3×0,075×0,075 м. Динамометр Energy BEZ-151A с ценой деления 0,5 Н применялся для измерения значений силы, необходимой для перемещения модели по смоделированному торфяному месторождению. Для оценки влия-

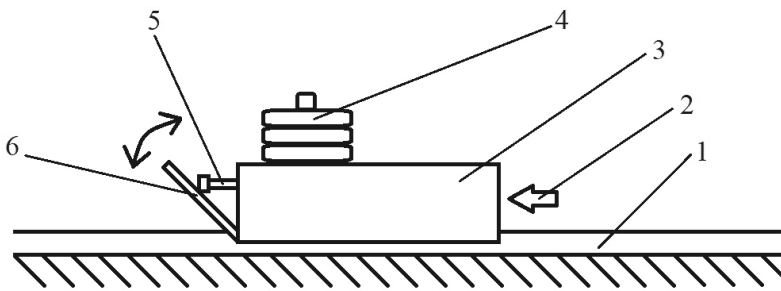


Рис. 3. Стенд для физического моделирования процесса перемещения платформы по торфяному месторождению: 1 – модель поверхности торфяного месторождения (поролон), 2 – усилие, измеряемое динамометром для перемещения модели платформы, 3 – модель платформы, 4 – нагрузка для пошагового изменения давления на поверхность, 5 – винт для регулировки угла фронтальной части модели, 6 – фронтальная часть модели с возможностью изменения угла

Fig. 3. Table simulator for physical modelling of platform movement over the peat deposit surface, where: 1 is a model of peat deposit surface (made of polyurethane foam); 2 is force required for platform model movement (measured with load gauge); 3 is a platform model; 4 is a load for incremental varying of the pressure applied to the surface; 5 is a screw angle of the frontal part of the model adjustment; and 6 is the frontal part of the model with adjustable angle

ния степени погружения модели было использовано два варианта поролон: толщиной 0,03 м и толщиной $5 \cdot 10^{-3}$ м. Транспортер служил для фиксации угла фронтальной части.

Для оценки выполнения условий физического моделирования был повторен эксперимент, проведенный на реальном месторождении. Угол фронтальной части модели был выставлен на 90° , что соответствует углу фронтальной части модели, используемой на реальном месторождении. Модель нагружалась от 12,5 Н до 100 Н с шагом в 12,5 Н. В качестве модели жесткого основания с трибологическими свойствами поверхности натуральной залежи выступает поролон толщиной $5 \cdot 10^{-3}$ м, а в качестве модели натуральной торфяной залежи применен поролон толщиной 0,03 м. На рис. 4 представлены кривые для эксперимента на реальном месторождении для двух случаев: по жесткому основанию с трибологическими свойствами поверхности натуральной залежи и по натуральной торфяной

залежи, а также кривые моделей жесткого основания с трибологическими свойствами поверхности натуральной залежи в виде поролон толщиной $5 \cdot 10^{-3}$ м и модели натуральной торфяной залежи в виде поролон толщиной 0,03 м.

Полученные кривые имеют схожие закономерности, что говорит об адекватности физического моделирования и возможности проведения эксперимента с различными углами фронтальной части модели для отслеживания влияния изменения угла. Стоит отметить, что в реальном торфяном месторождении сила сопротивления увеличивается значительно с увеличением давления, чем на стенде. Это происходит из-за разницы в плотности деформируемой опоры, что делает разным степень углубления на стенде и на реальном торфяном месторождении. Однако, несмотря на данную разницу, условие физического подобия выполняется, поскольку сами закономерности имеют общий характер: сила сопротивления возрастает при углубле-

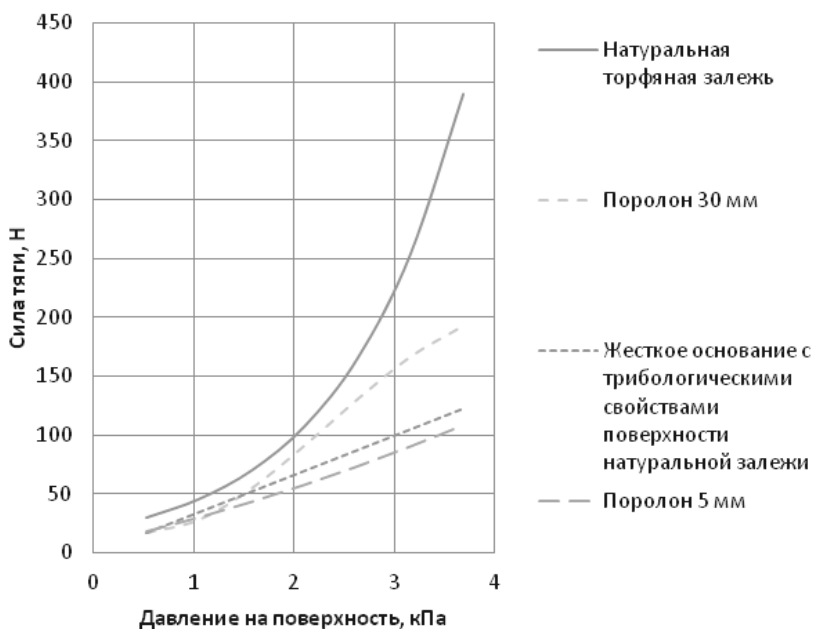


Рис. 4. Сравнение эксперимента на стенде и на реальном торфяном месторождении для модели с углом 90°

Fig. 4. Comparison between the results of the experiments at the table simulator and a real peat deposit for the model with 90° frontal part angle

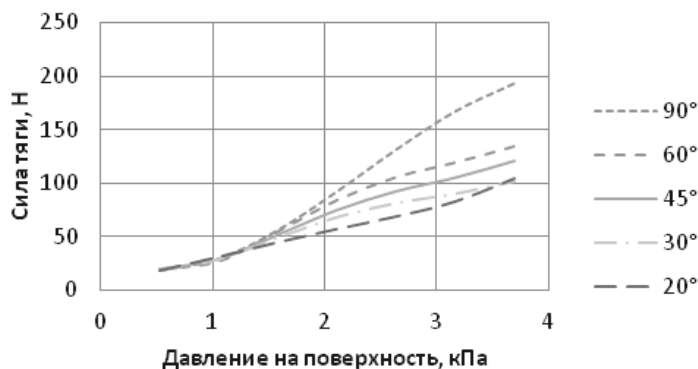


Рис. 5. Сводный график для пяти углов фронтальной части модели передвигаемой платформы

Fig. 5. Aggregated chart with the values of five models with different frontal part angles

нии в поверхность торфяного месторождения. Это означает, что на данном стенде можно провести экспериментальные исследования с изменением угла фронтальной части модели, и угол

с наименьшим сопротивлением будет справедлив и для реального торфяного месторождения.

Экспериментальные исследования влияния угла фронтальной части

модели проводились на разработанном стенде при разных давлениях на модель натуральной торфяной залежи в диапазоне от 12,5 Н до 100 Н с шагом в 12,5 Н. Были проведены исследования для следующих углов фронтальной части: 90°, 60°, 45°, 30°, 20°. Для каждого шага давления проводилось по 10 экспериментов, затем полученные 70 точек для каждого случая были аппроксимированы и представлены на сводном графике для 5 кривых на рис. 5.

На данном сводном графике можно заметить, что при достижении давления на поверхность в 1,25 кПа сопротивление начинает возрастать во всех случаях, образуя перегиб кривой. Это происходит по причине потери устойчивости деформируемой опоры, поролон начинает спрессовываться, а модель при этих значениях начинает заглубляться, что добавляет лобовое сопротивление. Стоит отметить, что при разных углах силы сопротивления различны. Наивысшее сопротивление достигается при угле в 90°, лобовая грань в данном случае выступает в роли рабочего органа бульдозера. Исполнение передвижной платформы с данным углом фронтальной части сделает затраты на передвижение платформы максимальными. Наименьшее сопротивление наблюдается при угле в 20°. В этом случае лобовая грань модели выступает в роли лыжи. Таким образом, за счет скольжения торфяное месторождение уплотняется постепенно, что значительно снижает сопро-

тивление и, как следствие, энергозатраты на передвижение.

Выводы

Разработанный стенд соответствует условиям геометрического и физического подобия, что дает возможность адекватного физического моделирования. Понимание природы сил сопротивления позволяет минимизировать сопротивления при перемещении платформы по месторождению путем модернизации фронтальной части и материала донной поверхности. Стенд позволяет производить большое количество экспериментов, что дает возможность детальной оценки закономерностей, наблюдающихся при перемещении платформы по поверхности торфяного месторождения. В процессе исследований, описанных в данной статье, выявлено, что снижение угла α фронтальной части платформы позволяет существенно снизить возникающие при перемещении сопротивления движению. Показана адекватность физического моделирования при движении по поверхности натуральной торфяной залежи и стендовым исследованиям на модели при ее перемещении по искусственной поверхности, представленной поролоном. Будущие экспериментальные исследования будут касаться анализа влияния соприкасающихся поверхностей для нахождения оптимального антифрикционного материала. Таким образом, можно будет добиться снижения энергозатрат при ведении работ на торфяном месторождении.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Mikhailov A., Zhigul'skaya A. and Yakonovskaya T.* Strip mining of peat deposit. Mine Planning and Equipment Selection: MPES 2017. 2017. pp. 497 – 501
2. *Кремчев Э. А.* Особенности структуры комплекса технологических операций при экскаваторной добыче торфа со стадийным обезвоживанием сырья // Записки Горного института. 2018. Т. 231. С. 225 – 234. DOI: 10.25515/PM1.2018.3.225

3. *Gharedaghloo B., Price J. S., Rezanezhad F. and Quinton W.* Evaluating the hydraulic and transport properties of peat soil using pore network modeling and X-ray micro computed tomography, *Journal of Hydrology*. 2018. 561, 494 – 508. 10.1016/j.jhydrol.2018.04.007
4. *Казиков Ю. А.* [и др.] Анализ парка машин при карьерной добыче торфа // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). – 2019. – № S20. С. 3 – 13.
5. *Зюзин Б. Ф.* [и др.] Комплексы горных машин для добычи биотоплива на торфяных месторождениях // Депонированная рукопись № 1121/04 – 18 12.02.2018
6. *Оганесян А. С.* [и др.] Машины и комплексы для ресурсосберегающей технологии добычи торфодревесного сырья // Сборник научно-практической конференции, приуроченной ко Дню российской науки Теоретические исследования и экспериментальные разработки студентов и аспирантов ТвГТУ. – 2017. С. 141 – 145
7. *Jucha W., Mareczka P. and Okupny D.* Using remote sensing materials to assess the effects of peat extraction on the morphology and vegetation cover of a raised bog. *Mires and Peat*. 2020. Vol. 26, 19 pp. DOI: 10.19189/МаР.2019.OMB.StA.1835
8. *Зюзин Б. Ф.* [и др.] Уборочные машины для комплексной механизации добычи торфодревесного сырья // Сборник XV Международной научно-технической конференции Технологическое оборудование для горной и нефтегазовой промышленности. – 2017. – С. 129 – 132.
9. *Mikhailov A., Zhigulskaya A. and Yakonovskaya A.* Excavating and loading equipment for peat mining, *IOP Conference Series Earth and Environmental Science*. 2017. 87(2) 022014, DOI:10.1088/1755 – 1315/87/2/022014
10. *Зюзин Б. Ф.* [и др.] Современные направления модернизации комплексов оборудования в связи с эволюцией способов добычи торфа // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). – 2015. – №. 6.
11. *Menegaki M., Michalakopoulos T. and Roumpos C.* Exploring the effect of physical, human and technical factors on bucket wheel excavators' efficiency: a fuzzy cognitive map approach, *International Journal of Mining and Mineral Engineering*. 2019. 10(2 – 4), pp. 189 – 204. DOI:10.1504/IJММЕ.2019.104447
12. *Инишева Л. И.* Торфяные почвы, генезис и подходы к их изучению // Сборник материалов VII Международной научной конференции, посвященной 90-летию кафедры почвоведения и экологии почв ТГУ Отражение био-, гео, антропо-сферных взаимодействий в почвах и почвенном покрове. – 2020. С. 57 – 60.
13. *Докучаева М. В.* [и др.] Болота – особый класс ландшафтов // Сборник международной научно-исследовательской конференции молодых ученых, аспирантов, студентов и старшеклассников Молодежная наука в XXI веке: традиции, инновации, векторы развития. – 2017. С. 199 – 202.
14. *Юдин С. А.* Основные теоретические и экспериментальные результаты обоснования инвариантов предельных напряженно-деформированных состояний при взаимодействии рабочих органов горных машин с торфяной залежью // Сборник научных трудов Теоретические исследования и экспериментальные разработки студентов и аспирантов Тверского государственного технического университета. – 2018. С. 162 – 169.
15. *Худякова И. Н.* [и др.] Выбор и обоснование параметров технологического оборудования комплекса добычи торфяного сырья из натуральной залежи // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно – технический журнал). – 2019. – № 3 (специальный выпуск 4). – С. 3 – 15. DOI: 10.25018/0236 – 1493 – 2019 – 3-4 – 3-15
16. *Фомин К. В.* [и др.] Оценка плотности распределения воздействий со стороны поверхности карты на элементы ходовых конструкций торфяной машины // Труды Инсторфа. – 2019. – № 20 (73). С. 32 – 36.

17. Божбов В. Е. [и др.] Анализ подходов к описанию процессов взаимодействия движителей лесных машин с почвогрунтами лесосек. — 2019. — Т. 16. № 2. С. 13–35. DOI: 10.15393/j2.art.2019.4482

18. Федоров Б. А. [и др.] Анализ метода расчета модуля общей деформации слабых грунтов // Молодежный научный вестник. — 2017. — № 11 (24). С. 171–180.


19. Кармацкий В. И. [и др.] Пути достижения высокой проходимости колесных движителей по торфяным основаниям // Сборник научных трудов Теоретические, экспериментальные и прикладные исследования молодых учёных Тверского государственного технического университета. — 2017. С. 449–454

20. Казаков Ю. А. Анализ условий функционирования горнотранспортного агрегата для транспортировки экскаваторного торфяного сырья // Сборник трудов XVII Международной научно-технической конференции Технологическое оборудование для горной и нефтегазовой промышленности. — 2019. С. 57–60.

21. Болотов А. Н. [и др.] Теоретические и экспериментальные исследования процессов в триботехнических системах // монография, Тверской государственный технический университет. — 2019.

22. Чувирина И. В. [и др.] Математическая обработка статических данных при пассивном эксперименте // Молодежный научный вестник. — 2017. — № 11 (24). С. 181–190.

23. Samson-Dô, M., St-Hilaire, A. Characterizing and modelling the trapping efficiency of sedimentation basins downstream of harvested peat bog. *Canadian Journal of Civil Engineering*, 45, pp. 478–488, 2018. DOI:10.1139/cjce2017–0330.

24. Якупов Д. Р. [и др.] Моделирование сопротивления перемещению грузов по поверхности торфяного месторождения // Горный информационно-аналитический бюллетень. — 2020. — №12 (специальный выпуск 45). С. 3–12. DOI: 10.25018/0236–1493–2020–12–45–3-12. 

REFERENCES

1. Mikhailov A., Zhigulskaya A. and Yakonovskaya T. Strip mining of peat deposit. *Mine Planning and Equipment Selection: MPES 2017*. 2017. pp. 497–501.

2. Kremcheev E. A. Specific Parameters of Technological Operations Performed during Peat Excavation with Staged Raw Material Dehydration [Osobennosti struktury kompleksa tekhnologicheskix operacij pri e'kskavatornoj doby'che torfa so stadijny'm obezvozhivaniem sy'r'ya], *Journal of Mining Institute*. 2018. vol. 231, pp. 225–234, DOI: 10.25515/PM1.2018.3.225 [In Russ]

3. Gharedaghloo B., Price J. S., Rezanezhad F. and Quinton W. Evaluating the hydraulic and transport properties of peat soil using pore network modeling and X-ray micro computed tomography, *Journal of Hydrology*. 2018. 561, 494–508.

4. Kazakov Yu. A. et al. Analysis of Machines for Open-cast Working Peat Extraction [Analiz parka mashin pri kar'ernoj doby'che torfa]. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2019. vol. S20, pp. 3–13 [In Russ]

5. Zyuzin B. F. et al. *Kompleksy gornyx mashin dlya doby'chi biotopliva na torfyanyx mestorozhdeniyax* [Systems of Mining Machines for Biofuel Extraction in a Peat Deposit], deposited manuscript. 2018. no. 1121/04–18 [In Russ]

6. Oganessian A. S. et al. *Mashiny i komplekсы dlya resursosberegayushhej tekhnologii doby'chi torfodrevesnogo sy'r'ya* [Mining Machines and Mining Systems for Resource Efficient Extraction of Peat and Wood Materials], *Sbornik nauchno-prakticheskoy konferencii, priurochennoj ko Dnyu Rossijskoj nauki Teoreticheskie issledovaniya i eksperimental'ny'e razrabotki studentov i aspirantov TvGTU*. 2017. pp. 141–145 [In Russ]

7. Jucha W., Marezcka P. and Okupny D. Using remote sensing materials to assess the effects of peat extraction on the morphology and vegetation cover of a raised bog. *Mires and Peat*. 2020. Vol. 26, 19 pp. DOI: 10.19189/MaP.2019.OMB.StA.1835

8. Zyuzin B. F. et al. *Uborochny'e mashiny' dlya kompleksnoj mexanizacii doby'chi torfodrevesnogo sy'r'ya* [Harvesting Machines for Complex Mechanization of Production of Peat and Wood Raw Materials], Sbornik XV Mezhdunarodnoj nauchno-texnicheskoj konferencii Texnologicheskoe oborudovanie dlya gornoj i neftegazovoj promy'shlennosti. 2017. pp. 129 – 132 [In Russ]

9. Mikhailov A., Zhigul'skaya A. and Yakonovskaya A. Excavating and loading equipment for peat mining, *IOP Conference Series Earth and Environmental Science*. 2017. 87(2) 022014, DOI:10.1088/1755 – 1315/87/2/022014

10. Zyuzin B. F. et al. *Sovremennyy'e napravleniya modernizacii kompleksov oborudovaniya v svyazi s e'volyuciej sposobov doby'chi torfa* [Modern Approaches to Mining Machinery Systems Modernization in Response to Peat Extraction Methods Development], *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2015. vol. 6 [In Russ]

11. Menegaki M., Michalakopoulos T. and Roumpos C. Exploring the effect of physical, human and technical factors on bucket wheel excavators' efficiency: a fuzzy cognitive map approach, *International Journal of Mining and Mineral Engineering*. 2019. 10(2–4), pp. 189 – 204. DOI:10.1504/IJMME.2019.104447

12. Inisheva L. I. *Torfyany'e pochvy', genezis i podxody' k ix izucheniyu* [Genesis of Peat Soil and Approaches to its Study], Sbornik materialov VII Mezhdunarodnoj nauchnoj konferencii, posvyashhennoj 90-letiyu kafedry' pochvovedeniya i e'kologii pochv TGU Otrazhenie bio-, geo, antroposferny'x vzaimodejstvij v pochvax i pochvennom pokrove. 2020. pp. 57 – 60 [In Russ]

13. Dokuchaeva M. V. et al. *Bolota osoby'j klass landshaftov* [Bogs as a Specific Landscape], Sbornik mezhdunarodnoj nauchno-issledovatel'skoj konferencii molody'x ucheny'x, aspirantov, studentov i starsheklassnikov Molodezhnaya nauka v XXI veke: tradicii, innovacii, vektory' razvitiya. 2017. pp. 199 – 202 [In Russ]

14. Yudin S. A. *Osnovny'e teoreticheskie i e'ksperimental'ny'e rezul'taty' obosnovaniya invariantov predel'ny'x napryazhenno-deformirovanny'x sostoyanij pri vzaimodejstvii rabochix organov gorny'x mashin s torfyanoj zalezhu* [Main Practical and Theoretical Results of the Validation of Stress-Strain Behavior Thresholds for Peat Winning Machine Working Bodies during their Interaction with Peat Deposit Materials], Sbornik nauchny'x trudov Teoreticheskie, e'ksperimental'ny'e i eksperimental'nye razrabotki studentov i aspirantov Tverskogo gosudarstvennogo texnicheskogo universiteta. 2018. pp. 162 – 169 [In Russ]

15. Khudyakova I. N. et al. Selection and Substantiation of Parameters of Technological Equipment of Peat Extraction Complex from Natural Deposits, *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2019. vol. 3 (special issue 4), pp. 3 – 15, DOI: 10.25018/0236 – 1493 – 2019 – 3-4 – 3-15 [In Russ]

16. Fomin K. V. et al. *Ocenka plotnosti raspredeleniya vozdeystvij so storony' poverxnosti karty' na e'lementy' xodovy'x konstrukcij torfyanoj mashiny'* [Assessment of Impact of Distribution Density from the Surface of the Peat Field to the Elements of Running Structures of a Peat Machine], *Trudy' Instorfa*. 2019. vol. 20 (73), pp. 32 – 36 [In Russ]

17. Bozhbov V. Ye. et al. Analysis of Approaches to Describing Processes of Interactions Between Chassis of Forest Machines with Logging Area Soils, *Resources and Technologies*. 2019. vol. 16, no. 2, pp. 13 – 35, DOI: 10.15393/j2.art.2019.4482 [In Russ]

18. Fyodorov B. A. et al. Analysis of Calculation Method for Determining the Module of Overall Deformation of Soft Soil, *Molodezhny'j nauchny'j vestnik*. 2017. vol. 11 (24), pp. 171 – 180 [In Russ]

19. Karmatskiy V. I. et al. *Puti dostizheniya vy'sokoj proxodimosti kolesny'x dvizhitelej po torfyany'm osnovaniyam* [Methods of Achieving High Wheel Chassis Performance

for Movement in Peat Deposit Soils], Sbornik nauchny`x trudov Teoreticheskie, e`ksperimental`ny`e i prikladny`e issledovaniya molody`x uchyony`x Tverskogo gosudarstvennogo texnicheskogo universiteta. 2017. pp. 449–454 [In Russ]

20. Kazakov, Yu. A. *Analiz uslovij funkcionirovaniya gornotransportnogo agregata dlya transportirovka e`kskavatornogo torfyanogo sy`r`ya* [Analysis of Operation Conditions of Mining Transporting Machine for Excavated Peat Material Transportation], Sbornik trudov XVII Mezhdunarodnoj nauchno-texnicheskoy konferencii Texnologicheskoe oborudovanie dlya gornoj i neftegazovoj promy`shlennosti. 2019. pp. 57–60 [In Russ]

21. Bolotov A. N. et al. *Teoreticheskie i e`ksperimental`ny`e issledovaniya processov v tribotexnicheskix sistemax* [Theoretical and Practical Research of Tribosystem Processes`], monograph. 2019. Tverskoj gosudarstvenny`j texnicheskix universitet, Tver`. [In Russ]

22. Chuvirina I. V. et al. Mathematical Processing of Statistical Data in a Passive Experiment, *Molodezhny`j nauchny`j vestnik*. 2017. vol. 11 (24), pp. 181–190 [In Russ]

23. Samson-Dô, M., St-Hilaire, A. Characterizing and modelling the trapping efficiency of sedimentation basins downstream of harvested peat bog. *Canadian Journal of Civil Engineering*, 45, pp. 478–488, 2018. DOI:10.1139/cjce2017–0330.

24. Iakupov D. R. et al. Modelling of Cargo Motion Resistance during its Movement over the Peat Deposit Surface, *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2020., vol. 12 (special issue 45), pp. 3–12, DOI: 10.25018/0236–1493–2020–12–45–3-12

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

*Якупов Дмитрий Радикович*¹ – аспирант кафедры машиностроения, e-mail: s195037@stud.spmi.ru;

*Иванова Полина Викторовна*¹ – канд. техн. наук., ассистент кафедры машиностроения, e-mail: Ivanova_PV@pers.spmi.ru;

*Иванов Сергей Леонидович*¹ – докт. техн. наук, профессор, профессор кафедры машиностроения, e-mail: Ivanov_SL@pers.spmi.ru;

¹ Санкт-Петербургский горный университет, Санкт-Петербург, Россия.

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

*Yakupov D. R.*¹, Postgraduate student at the Department of Mechanical Engineering, e-mail: s195037@stud.spmi.ru;

*Ivanova P. V.*¹, Cand. Sci. (Eng.), assistant lecturer of the Department of Mechanical Engineering, e-mail: Ivanova_PV@pers.spmi.ru;

*Ivanov S. L.*¹, Dr. Sci. (Eng.), Professor, Professor of the Department of Mechanical Engineering, e-mail: Ivanov_SL@pers.spmi.ru;

¹ Saint Petersburg Mining University, Saint Petersburg, Russia.

Получена редакцией 27.01.2021; получена после рецензии 17.03.2021; принята к печати 10.04.2021.

Received by the editors 27.01.2021; received after the review 17.03.2021; accepted for printing 10.04.2021.

