

УДК
622.331:
622.271

А.В. Михайлов, А.Г. Таранов

ВЫЕМКА ТОРФЯНОГО СЫРЬЯ ВИЛЬЧАТЫМ ГРЕЙФЕРОМ

Описана экономичная система селективной выемки малоразложившегося торфяного сырья, применяемого для производства фильтрующего материала.

Торфяные залежи имеют малую плотность и низкую прочность и представляют легко деформируемые системы, при нагружении которых, наблюдается условно-мгновенная, медленная высокоэластичная деформация и деформация течения. Развитие каждой из них зависит, в основном, от прочности структуры торфа, состоящей из растительных остатков, образующих структуры переплетения, и коагуляционных структур продуктов распада.

Проведенные исследования позволяют отметить что, процесс сжатия при экскавации торфяного сырья из торфяной залежи должен быть реализован при внешнем напряжении (силовое воздействие со стороны вильчатого грейфера), которое превышает предел текучести торфяного сырья. Величина внешнего напряжения должна быть выбрана с учетом преодоления напряжения сдвига верхнего слоя торфяной залежи, что гарантирует заполнение объема вильчатого грейфера с коэффициентом уплотнения 1,3.

Ключевые слова: торфяное сырье, селективная выемка, вильчатый грейфер, модель Зинера, напряжение, деформация, модуль упругости, вязкость.

Введение

Эффективным вариантом освоения торфяного месторождения следует считать такой, который обеспечивает максимальную экономическую выгоду от использования потенциальной ценности полезного ископаемого при строгом ограничении негативного воздействия на составляющие окружающей среды. Процесс добычи торфа на слабоосушенных торфяниках придает экологическое звучание способу управления экосистемой торфяного месторождения. Технология добычи влажного торфяного сырья устраняет ряд проблем, существующей технологии добычи фрезерного торфа. По применяемым в настоящее время технологиям требуются осушить огромные площади и на длительное время изменить естественные функции болот. Метод экскавации торфяного сырья обеспечивает прогрессивное восстановление области производства, поскольку только на от-

носителем малую область торфяника воздействовали в определенное время [1].

Повышение технического уровня выемочно-погрузочных машин обусловлено расширением функциональных возможностей их рабочих органов путем создания новых конструкций, адаптированных к условиям эксплуатации. Наиболее перспективным подходом в создании высокоэффективных рабочих органов и грузозахватных устройств выемочно-погрузочных манипуляторов является использование механизмов, обладающих повышенными технологическими возможностями.

Селективная добыча торфяного сырья для производства торфяных фильтрующих материалов [1] позволяет относительно быстро восстанавливать прежнюю растительность. После извлечения торфа на поверхности залежи остаются площадки с удаленной натуральной растительностью. При селективной добыче торфяного сырья для производства фильтрующих материалов вынимается верхний слой торфяной залежи до 0,5 м. Метод выемки торфяного сырья заключается в экскавации при помощи грейфера с погрузкой в тракторный полуприцеп для транспортирования на суходол. Глубина экскавации, в частности толщина слоя малоразложившегося торфа, остающегося в основании лагуны после извлечения, важна по отношению к процессу восстановления месторождения [1].

Машинотракторный агрегат (МТА) с грейферным оборудованием во время работы передвигается по карьере меньше, чем машины других типов. В основном он производит выемку торфа с одной технологической установки. Так как разрабатываются небольшие по размерам площадки, то схема работы удовлетворяет технологическим требованиям при селективной выемке торфяного сырья. МТА располагается вдоль забоя с таким расчетом, чтобы угол поворота на выгрузку в транспортный полуприцеп не превышал 70–90°. Добыча торфяного сырья может производиться практически круглый год независимо от метеорологических условий [2].

Анализ параметров экскавируемой среды

Торфяная залежь является весьма сложной средой, обладающей упругостью, вязкостью, к тому же усилие отрыва зависит от скорости отделения материала. Торфяные залежи имеют малую плотность и низкую прочность и представляют легко деформируемые системы, при нагружении которых наблюдается условно-мгновенная ϵ_0 , медленная высокоэластичная дефор-

мация ϵ_a и деформация течения ϵ_t . Развитие каждой из них зависит, в основном, от прочности структуры торфа, состоящей из растительных остатков, образующих структуры переплетения, и коагуляционных структур продуктов распада [3].

Формоизменение в технологических процессах выемки торфа из залежи может быть достаточно сложным. В естественном торфе деформационные явления и прочностные характеристики во многом зависят от степени развития структур переплетения. При простом деформировании расчленение этих структур на отдельные элементы маловероятно. В большинстве случаев они разрушаются необратимо. В отличие от чисто коагуляционных структур продуктов распада торфа (жидкообразных суспензий гуминовых веществ), свойства которых определяются соотношением энергией межагрегатного и внутриагрегатного взаимодействий, природа необратимо разрушающихся структур переплетения определяется также механическими свойствами отдельных волокон. Как правило, структуры переплетения придают торфу упругость и высокоэластичность.

Многочисленные исследования в области изучения физико-механических свойств торфяных залежей показали, что у подавляющего большинства видов верхового торфа преобладает условно-мгновенная деформация ϵ_0 . Торф в залежи с нарушенной структурой относится к нулевому структурно-механическому типу, где $\epsilon_0 \gg \epsilon_t$ [3].

Степень сжимаемости и явления, происходящие при уплотнении, зависят от свойств и структуры торфа. Наибольшей сжимаемостью отличается торф малой степени разложения, имеющий высокую пористость до уплотнения ($e \geq 25$). Под давлением $\sigma \approx 100$ кПа пористость такого торфа уменьшается почти вдвое. Скорость сжатия торфа зависит от его влажности и толщины слоя.

При нагрузках, не превышающих условный статический предел текучести, в торфе обнаруживаются лишь условно-мгновенные и медленные деформации, протекающие без разрушений в структуре. Несколько иной механизм структурообразования в торфе при компрессионном (одноосном) уплотнении. Здесь при давлениях до 30 кПа сохраняется прямо пропорциональная зависимость между напряжением и деформациями.

Микроструктуры торфа формируют надмолекулярные образования органических и минеральных соединений. Если эти соединения объединены в ассоциаты (агрегаты), то они выделяются во внутри- и межагрегатные структуры разной ком-

пактности. Наличием таких структур определяются деформационные, упруго-кинетические и реологические характеристики торфа и особенности внутри- и межагрегатных связей.

Наличие в торфе гидрофильных полуколлоидов, стабилизированных гидрофобных включений, а также растворов и дисперсий высокомолекулярных соединений придает ему специфические свойства, отличающие его от типичных коллоидных гетерогенных систем [4].

Одним из методов описания деформационных процессов в торфяной залежи является использование механических моделей, которые позволяют объяснить структуру и механизм явлений, происходящих при этом.

На рис. 1 показана схема выемки материала вильчатым грейфером при глубине внедрения H (рис. 1, *a*). Будем считать, что за время цикла закрытия грейфера материал на поверхности торфяной залежи переместился на величину L по направлению к середине грейфера. При сдвиге в материале под действием горизонтальных сжимающих сил возникают напряжения и его деформация.

Строение порового пространства реальных тел, особенно торфа, отличается большой сложностью. Поэтому практически невозможно структуру торфа охарактеризовать каким-то одним количественным критерием, которым можно учесть величину, форму, взаимное расположение и соотношение слагающих его элементов (растительные остатки и продукты их разложения) и пор. В тех случаях, когда необходимо качественно оценить характер структурных изменений в ходе различных технологических процессов, истинное пористое тело заменяют моделью. Растительные остатки малоразложившегося торфа содержат упругие волокна и воду, и под действием внешних сил проявляют вязкоупругость. Упругая деформация реализуется за счет волокон растительных остатков, образующих структуры переплетения, а ползучесть — коагуляционных структур продуктов распада.

Материал и методы исследований

Объектом исследований является легкодеформируемый торфяной волокнистый материал, а их предметом — моделирование процесса сжатия материала при постоянной нагрузке. Образцы торфяной залежи объемом $0,008 \text{ м}^3$ вырезались на торфяном месторождении Государственного лесного фонда «Камешки» кадастровый номер 666 Всеволожский район Ленинградской

области. Торфяная залежь сложена верховым фускум торфом малой степени разложения $R = 10\%$, $A = 1,4\%$, $w = 89,6\%$.

Определение сопротивления сдвигу (удельного сцепления) верхнего слоя торфяной залежи в условиях естественного залегания било проведено с использованием сдвигомера-крыльчатки СК-10 [5]. Прочность торфяной залежи перед выемкой образцов оценивалась на глубину 0,1; 0,2 и 0,3 м и составила соответственно 20,49, 21,20 и 22,13 кПа соответственно.

Экспериментальные исследования были проведены на реометрическом комплексе собственной конструкции в условиях одноосного сжатия исследуемых кубических образцов торфа цилиндрическим деформатором диаметром 20 мм. Величина нормального (сжимающего) напряжения составляла 12,5 и 20,0 кПа. В условиях одноосного сжатия образца торфа при постоянном сжимающем напряжении осуществляли измерение возникающей при этом абсолютной деформации с последующим вычислением относительной деформации.

Результаты

Модельный материал состоит из двух типов волокон (например, отличных по расположению, структуре или толщине) с разными упругими свойствами и из ячеек порового пространства, заполненных фрагментами надмолекулярных структур и вязкого гумуса жидкостью. Под действием нагрузки волокна будут деформироваться (на рис. 2, *a* – сжиматься), возникнут микротечения жидкости в поровом пространстве. Эти механические процессы будут определять реакцию материала в целом на внешние силы. При этом волокна торфа будут вести себя подобно пружинам с разными модулями упругости, а характер течения жидкости в поровом пространстве будет описываться законом Ньютона.

Тогда реологической моделью исследуемой структуры, которая состоит из последовательно соединенных упругого элемента и модели Кельвина-Фойгта, будет соединение двух пружин и одного вязкого элемента [6] так, как это изображено на рис. 2, *б*. Моделью, позволяющей учесть высокоэластичную компоненту малоразложившегося торфа, является трехэлементная реологическая модель Зинера – линейного вязкоупругого тела [7, 8], состоящая из двух упругих элементов G_1 и G_2 и вязкого элемента η . На схеме около каждого элемента записаны в параллельном соединении деформации одинаковые, а напряжения складываются; при последовательном соединении напряжения одина-

ковые, а деформации складываются. При действии постоянной нагрузки мгновенно сжимается пружина 1, затем вытягивается поршень и сжимается пружина 2.

Деформация скелета происходит за счет изменения объема пор в результате перекомпоновки агрегатов, их взаимного смещения и более плотной укладки, соответствующей минимуму потенциальной энергии.

Напряжения обеих частей равны, а полная деформация трех-элементной модели складывается из деформаций частей

$$\varepsilon = \varepsilon_1 + \varepsilon_2.$$

Определяющее соотношение, связывающие напряжение и деформацию [9,10]

$$\frac{d\sigma}{dt} \eta + (E_1 + E_2) \sigma = E_1 E_2 \varepsilon + \eta E_2 \frac{d\varepsilon}{dt}.$$

где ε – общая деформация; σ – величина действующей нагрузки на единицу площади, Н/м²; E_1 – условно-мгновенный модуль упругости, Н/м²; E_2 – модуль запаздывающей упругости, Н/м²; η – кажущаяся или эффективная вязкость как функция градиента скорости, Па·с; t – время, с.

Реологическое уравнение позволяет выполнить имитационное моделирование поведения упруго-вязко-пластичного тела при постоянных значения деформации или напряжения [11].

Представленная зависимость – сумма мгновенно-упругой, эластической и вязкой составляющих

$$E_1 = \sigma/\varepsilon_1, E_2 = \sigma/\varepsilon_1 - \varepsilon_2, \eta = \sigma/\text{tg}\beta - \text{tg}\alpha.$$

где ε_1 – условно-мгновенная деформация; ε_2 – эластическая деформация.

Полученные на основе модели Зинера выражения для расчета вязкости, модуля сдвига и модуля потерь позволяют достаточно корректно проводить расчеты механических характеристик в области высокоэластичности образца. Данные результаты достаточно хорошо согласуются с экспериментальными данными исследования.

Наиболее полную картину изменения реологических свойств торфа дают кривые деформации ε во времени t , полученные путем определения кинетики деформации сжатия в период приложения деформирующей силы [12] (рис. 3).

При мгновенном приложении напряжения о возникает упругая обратимая деформация. Далее деформация идет по криво-

Реологические свойства торфяного сырья

Модуль упругости		Вязкость, кПа·с
быстрой эластической деформации E_1 , кПа	медленной эластической деформации E_2 , кПа	
80	87	11,5

линейному участку, что объясняется явлением упругого последствия, когда одновременно развиваются упругие и пластичные действия.

Общим для графических зависимостей является появление мгновенной упругой и эластической деформаций. Мгновенная упругая деформация обнаруживает себя в момент времени $t = 0$.

Обработка экспериментальных данных по известным методикам [13, 14] позволила получить значения реологических констант (таблица). Установлено, что при доверительной вероятности 95%, реологическое уравнение адекватно описывает экспериментальные данные. Максимальная ошибка при этом составляет 9,4%.

Проведенные исследования позволяют отметить, что процесс сжатия для выемки торфяного сырья из торфяной залежи должны быть реализованы при внешнем напряжении (силовое воздействие со стороны вильчатого грейфера), которое превышает предел текучести торфяного сырья. Величина внешнего напряжения должна быть выбрана с учетом преодоления напряжения сдвига торфяной залежи, что гарантирует заполнение объема грейфера.

Реологическая модель торфяного сырья позволяет прогнозировать его деформационное поведение в условиях сжатия материала грейфером, а также выполнить расчет производительности при выемке.

Объем двухчелюстного вильчатого грейфера $0,17 \text{ м}^3$ определяется предельным опрокидывающим моментом на стреле гидроманипулятора. При значениях полученных деформаций торфяного сырья коэффициент наполнения ковша грейфера составляет 1,3.

Заключение

Моделирование процесса горизонтального сжатия торфяного волокнистого сырья зубьями вильчатого грейфера при фиксированной нагрузке показало, что для оценки напряжения легкодеформируемых торфяных материалов при их выемке из

торфяной залежи с определенными допущениями можно пользоваться аналитикой на базе механической модели Зинера.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Адамов А. А., Матвеевко В. П., Труфанов Н. А.* Методы прикладной вязкоупругости. – Екатеринбург: УрО РАН, 2003. – 412 с.
2. *Арет В. А., Николаев Б. Л., Николаев Л. К.* Физико-механические свойства сырья и готовой продукции. – СПб.: ГИОРД, 2009. – 448 с.
3. *Базин Е. Т.* Торф и торфяные месторождения: проблемы изучения, орошения, добычи, переработки, комплексного использования, ресурсосбережения и экологии. – СПб.: ВНИИТП, 1993. – 123 с.
4. *Лиштваи И. И.* Физико-химические свойства торфа и их трансформация при использовании торфяных месторождений // Химия твердого топлива. – 2010. – № 6. – С. 3–10.
5. *Малкин А. Я., Исаев А. И.* Реология: концепции, методы, приложения. – СПб.: Профессия, 2007. – 580 с.
6. *Михайлов А. В., Таранов А. Г., Сеницкий В. И.* Принципы селективной экскавации торфяного сырья / Инновационные системы отведения и очистки поверхностных стоков с урбанизированных территорий: материалы междунар. науч.-пр. конфер. – Петрозаводск: «Свое издательство», 2014. – С. 74–81.
7. *Михайлов А. В., Таранов А. Г.* Комплект выемочного оборудования для селективной добычи торфяного сырья / Инновации на транспорте и в машиностроении: сб. трудов III междунар. науч.-пр. конфер. Т. II. – СПб.: Национальный минерально-сырьевой университет «Горный», 2015. – С. 55–59.
8. *Миронов В. А., Галкин Н. Н.* Определение физико-механических свойств грунтов при проектировании оснований зданий и сооружений. – Тверь: ТвГТУ, 2006. – 43 с.
9. *Магомедов Г. О., Журавлев А. А., Шевякова Т. А., Плотникова И. В.* Реологическая модель деформационного поведения сахарного теста в условиях одноосного сжатия // Вестник ВГУИТ. – 2014. – № 4. – С. 110–114.
10. *Francesco Mainardi, Giorgio Spada.* Creep, Relaxation and Viscosity Properties for Basic Fractional Models in Rheology. The European Physical Journal, Special Topics, Vol. 193 (2011) pp.133–160.
11. *Georg Bauer, Christian Friedrich, Carina Gillig, Fritz Vollrath, Thomas Speck, Chris Holland.* Investigating the rheological properties of native plant latex. J. R. Soc. Interface, 2014, 11, 20130847; DOI: 10.1098/rsif.2013.0847.
12. *Houanou K.A., Tchêhouali A., Foudjet A.E.* Identification of Rheological Parameters of the linear Viscoelastic Model of two species of tropical woods (*Tectona grandis* Lf and *Diospyros mespiliformis*). Research Journal of Engineering Sciences. Vol. 1(5), November (2012), pp. 17–24.
13. *Rao M.A.* Rheology of Fluid, Semisolid, and Solid Foods: Principles and Applications. London: Springer New York Heidelberg Dordrecht, 2014. № XIII. P. 461.
14. *Severino P. C. Marques, Guillermo J. Creus.* Computational Viscoelasticity. Springer Briefs in Computational Mechanics 2012, XI, 124 p. **ПИАБ**

КОРОТКО ОБ АВТОРАХ

Михайлов Александр Викторович – доктор технических наук, профессор, e-mail: epc68@mail.ru,
Таранов Алексей Геннадьевич – аспирант, e-mail: taran007@list.ru,
Национальный минерально-сырьевой университет «Горный».

UDC
622.331:
622.271

A.V. Mikhaylov, A.G. Taranov **PEAT EXCAVATION BY GRAPPLE FORK**

This work focuses on the description of an economic system of the low-decayed peat raw materials selective excavation applied in the production of filtering material. The method of natural peat excavation provides progressive restoration of production area as influenced only rather small area of a peat bog in certain time. The method of peat raw materials excavation consists in use by means of the grapple fork with loading in the tractor semitrailer for transportation.

Peat deposits have a low density and low strength, are easily deformable system the loading that occurs conditionally, instant, slow highly elastic deformation, and flow deformation. The development of each of them depends mainly on the strength of the structure of peat, consisting of plant residues, forming the interlacement structures, and coagulation structures of disintegration products.

When the shift fork jaws of the grapple in the material under the action of horizontal compressive forces arise stress and deformation. The model allows to take into account the highly elastic component of the low-decayed peat is the three-element of the Zener rheological model of a linear viscoelastic body. Obtained on the basis of the Zener model linear viscoelastic body the expressions for the calculation of the conditionally instantaneous modulus of elasticity, modulus of delayed elasticity and viscosity allow a fairly accurate calculation of the mechanical characteristics in the field of highly elastic sample. These results are in good agreement with the experimental data of the research.

Compression process at peat raw materials excavation from a peat deposit must be exercised when external stress (power influence from the grapple fork) that exceeds the yield strength of the peat raw materials. The value of the external stress has to choose with regard to overcoming shear stress of the top layer of peat deposit, which guarantees a filling volume of grapple fork with a compaction factor of 1.3.

Key words: peat raw material, selective excavation, grapple fork, Zener model, stress, compression deformation, modulus of elasticity, viscosity.

AUTHORS

*Mikhaylov A.V.*¹, Doctor of Technical Sciences, Professor,
e-mail: epc68@mail.ru,
*Taranov A.G.*¹, Graduate Student,
e-mail: taran007@list.ru,

¹ National Mineral Resource University «University of Mines»,
199106, Saint-Petersburg, Russia.

REFERENCES

1. Adamov A. A., Matveenkov V. P., Trufanov N. A. *Metody prikladnoy vyazkoupругosti* (Methods of applied viscoelasticity) Ekaterinburg, UrO RAN, 2003, 412 p.
2. Aret V. A., Nikolaev B. L., Nikolaev L. K. *Fiziko-mekhanicheskie svoystva syr'ya i gotovoy produktsii* (Physico-mechanical properties of raw materials and finished products), Saint-Petersburg, GIOR, 2009, 448 p.
3. Bazin E. T. *Torf i torfyanye mestorozhdeniya: problemy izucheniya, orosheniya, dobychi, pererabotki, kompleksnogo ispol'zovaniya, resursoberezheniya i ekologii* (Peat and peatlands: problems of studying, irrigation, production, processing, integrated use, resource saving and ecology), Saint-Petersburg, VNIITP, 1993, 123 p.
4. Lishtvan I. I. *Khimiya tverdogo topliva*. 2010, no 6, pp. 3–10.
5. Malkin A. Ya., Isaev A. I. *Reologiya: kontseptsii, metody, prilozheniya* (Rheology: concepts, methods, applications), Saint-Petersburg, Professiya, 2007, 580 p.
6. Mikhaylov A. V., Taranov A. G., Sinitskiy V. I. *Innovatsionnye sistemy otvedeniya i ochistki poverkhnostnykh stokov s urbanizirovannykh territoriy: materialy mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii* (Innovative discharge and treatment of surface flows from urbanized territories: International Scientific-Practical Conference Proceedings), Petrozavodsk, «Svoe izdatel'stvo», 2014, pp. 74–81.
7. Mikhaylov A. V., Taranov A. G. *Innovatsii na transporte i v mashinostroenii: sbornik trudov III mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii. Tom II* (Innovations in Transport and Machine Engineering: The 3rd International Scientific-Practical Conference Proceedings, vol. II), Saint-Petersburg, Natsional'nyy mineral'no-syr'evoy universitet «Gornyy», 2015, pp. 55–59.
8. Mironov V. A., Galkin N. N. *Opredelenie fiziko-mekhanicheskikh svoystv gruntov pri proektirovanii osnovaniy zdaniy i sooruzheniy* (Determination of physico-mechanical properties of soils in the design of foundations of buildings and structures), Tver, TvGTU, 2006, 43 p.
9. Magomedov G. O., Zhuravlev A. A., Shevyakova T. A., Plotnikova I. V. *Vestnik VGUIT*. 2014, no 4, pp. 110–114.
10. Francesco Mainardi, Giorgio Spada. Creep, Relaxation and Viscosity Properties for Basic Fractional Models in Rheology. *The European Physical Journal, Special Topics*, Vol. 193 (2011) pp.133–160.
11. Georg Bauer, Christian Friedrich, Carina Gillig, Fritz Vollrath, Thomas Speck, Chris Holland. Investigating the rheological properties of native plant latex. *J. R. Soc. Interface*, 2014, 11, 20130847; DOI: 10.1098/rsif.2013.0847.
12. Houanou K.A., Tch  houali A., Foudjet A.E. Identification of Rheological Parameters of the linear Viscoelastic Model of two species of tropical woods (*Tectona grandis* Lf and *Diospyros mespiliformis*). *Research Journal of Engineering Sciences*. Vol. 1(5), November (2012), pp. 17–24.
13. Rao M.A. Rheology of Fluid, Semisolid, and Solid Foods: Principles and Applications. *London: Springer New York Heidelberg Dordrecht*, 2014, no XIII. P. 461.
14. Severino P. C. Marques, Guillermo J. Creus. Computational Viscoelasticity. *Springer Briefs in Computational Mechanics* 2012, XI, 124 p.

