

НЕДРОПОЛЬЗОВАНИЕ И ГОРНЫЕ НАУКИ

УДК 622.331:662.64

ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ ОБОСНОВАНИЕ РАЦИОНАЛЬНЫХ ПАРАМЕТРОВ ТОРФЯНОГО КУСКА ТРУБЧАТОЙ ФОРМЫ

А.Л. ЯБЛОНЕВ, д-р техн. наук

Тверской государственный технический университет,
170026, Тверь, наб. Аф. Никитина, 22, e-mail: alvovich@mail.ru

© Яблонев А.Л., 2025

Трубчатая форма кускового торфа по праву считается наиболее перспективной, поскольку обладает большей площадью испарения влаги, лучше поджигается и стабильнее горит в твердотопливных котлах. Такой кусок характеризуется такими параметрами, как наружный диаметр, внутренний диаметр, длина. Естественно, что возникают вопросы о параметрах, которые можно назвать рациональными, или оптимальными по критериям прочности на изгиб, технологичности и равномерности сушки. В данной статье сделана попытка ответить на поставленные вопросы теоретически. Приведены рекомендуемые рациональные соотношения диаметров и сами диаметры торфяных кусков. Отмечено, что предполагается необходимая экспериментальная проверка полученных результатов в лабораторных условиях.

Ключевые слова: кусковой торф, прочность на изгиб, трубчатая форма поперечного сечения куска, изгибающий момент, толщина стенки куска, время сушки куска, разрушающая нагрузка.

DOI: 10.46573/2658-5030-2025-1-32-39

ВВЕДЕНИЕ

Добыча кускового торфа является ярким примером внутрирегионального получения твердого местного коммунального (коммунально-бытового) топлива [1, 2]. Транспортное плечо от полей добычи до потребителей редко превышает 100 км и в большинстве случаев ограничивается 30-километровой зоной. Средняя теплотворная способность у кускового торфа с содержанием влаги 33 % составляет 13,2 МДж/кг против 10 МДж/кг у дров с содержанием влаги 25...30 % и 12,47 МДж/кг у подмосковного бурого угля, а низшая рабочая теплота сгорания в среднем равна 11,7 МДж/кг [3], что говорит о весьма высокой эффективности кускового торфа.

Теплотворная способность торфа обеспечивается его плотностью, а на плотность влияют в основном режимы работы добычных машин [4]. Объемная усадка куска, происходящая при испарении влаги, способствует повышению плотности [5, 6]. Последнее способствует уменьшению крошимости, повышению прочности, а следовательно, снижению потерь торфа при технологическом цикле добычи [7]. Нормальной плотностью, обеспечивающей необходимую теплотворную способность, считается 750...1 100 кг/м³. В работах [8, 9] показано, что поскольку основные производственные операции при добыче куска связаны с изгибными деформациями, то прочность на изгиб и должна быть тем параметром, который гарантирует сохраняемость торфа. Была проведена серия экспериментов по лабораторному формованию (рис. 1) и исследованию кускового торфа, в ходе которых разработан специальный стенд по оценке

изгибной прочности кускового торфа [10–12]. Однако предложенная методика касалась испытания лишь образцов круглого и прямоугольного сечения.



Рис. 1. Формование кускового торфа цилиндрического сечения на шнековом прессе

Анализ современной производственной практики показал, что наряду с круглым и прямоугольным сечением получили развитие трапецеидальное, квадратно-пустотелое и трубчатое сечения куска [13]. Наиболее перспективным следует считать именно трубчатое сечение, поскольку такой кусок имеет большую площадь поверхности, а значит, быстрее и интенсивнее сохнет и, кроме того, легче загорается и стабильнее горит в твердотопливных котлах. Однако вопросом остается рациональное соотношение наружного D и внутреннего d диаметров трубчатого куска по ряду критериев, а также их значения. Поэтому цель данной статьи – попытаться теоретически осветить этот аспект с позиций прочности куска, технологичности его производства и интенсивности сушки.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Трубчатая форма куска, хотя и не является новой, однако еще не получила широкого распространения. В конце 1980-х годов Всесоюзным научно-исследовательским институтом торфяной промышленности был разработан, создан и испытан проект машины для добычи, формования и выстилки кускового торфа трубчатой формы [14]. Причем выстилка производилась не «внаброс» и не прямыми лентами, как принято, а с переворотом и установкой куска наружным диаметром $D = 160$ мм, внутренним $d = 100$ мм и длиной $l \approx 250$ мм в вертикальное положение. Данная конструкция не дошла до стадии серийного изготовления из-за внедрения рыночной экономики, хотя именно для нее и планировалась [13]. По сохранившимся фотографиям, сделанным в ходе испытаний, все же можно судить о том, что надежность метода установки куска в вертикальное положение была далека от 100 %. Значительные части высланных кусков находились либо в горизонтальном, либо сильно наклоненном положении. Автором работы было отмечено, что с уменьшением диаметра куска происходит снижение первого критического влагосодержания во время сушки и увеличение постоянного периода сушки. Увеличение диаметра (размера) куска снижает влияние осадков на процесс сушки. Однако существенное увеличение диаметра куска приводит к повышению общей продолжительности цикла за счет

возрастания убывающего периода сушки [14]. Налицо задача оптимизации, рассматривать и решать которую можно и нужно как теоретически, так и экспериментально.

Данное исследование получило развитие в последующем. Так, в работах [15–19] предлагается с помощью стилочной машины выстилать вертикально стоящий кусок трубчатой формы с параметрами $D = 180$ мм, $d = 100$ мм и $l = 250$ мм. При этом конструкция машины включает составной мундштук с обратным букелем (для постепенного снятия внутренних напряжений в куске). Показано, что вертикальное расположение куска позволяет более рационально использовать при сушке энергию обдувающего ветра. Запатентован механизм установки куска в вертикальное положение, произведен анализ напряженно-деформированного состояния куска в процессе его изгиба при выходе из мундштука и перевороте. Проведена серия экспериментов на физической модели шнекового пресса, изготовленного по всем известным правилам и нормам [20, 21]. Однако прочностные свойства куска после окончания сушки исследованы.

Поскольку работы [10, 11] содержат подробное описание устройства стенда для испытания формованной торфяной продукции на изгибную прочность, не будем здесь приводить всю методику досконально. Отметим лишь, что напряжения изгиба определяется по известной формуле [22]:

$$\sigma_{\text{и}} = \frac{M_{\text{и max}}}{W_x}, \quad (1)$$

где $M_{\text{и max}}$ – максимальное значение изгибающего момента, действующего по всей длине L образца, которое достигается в точке приложения нагрузки (посередине между опорами); W_x – момент сопротивления сечения образца.

В работах [10, 11] также получено выражение для определения максимального изгибающего момента:

$$M_{\text{и max}} = 0,25FL, \quad (2)$$

где F – приложенная разрушающая нагрузка; L – расстояние между установочными опорами стенда.

В статье [13] по материалам источника [23] представлена формула для оценки момента сопротивления трубчатого (кольцевого сечения) образца:

$$W_{x \text{ труб}} = \frac{\pi D^3}{32} \left[1 - \left(\frac{d}{D} \right)^4 \right], \quad (3)$$

а также получена формула для оценки на стенде напряжения изгиба образца:

$$\sigma_{\text{и труб}} = \frac{8FL}{\pi D^3 \left[1 - \left(\frac{d}{D} \right)^4 \right]} \leq [\sigma_{\text{и}}], \quad (4)$$

где $[\sigma_{\text{и}}]$ – допускаемое напряжение при изгибе образца кускового торфа, которое может быть принято равным 3,5...4,5 МПа [3, 10, 11].

Анализ простой формулы (1) позволяет сделать вывод, что при одинаковом максимальном изгибающем моменте $M_{\text{и max}}$ напряжения изгиба будут больше у того образца, у которого меньше момент сопротивления изгибу W_x . Из того, что изгибающий момент создается разрушающей нагрузкой F и расстоянием между опорами L (а они для сравниваемых условий должны быть одинаковыми), вытекает следующий, не менее простой вывод о том, что при одинаковой разрушающей нагрузке напряжения на

изгиб будут меньше в том образце, у которого больше момент сопротивления. Для теоретического исследования изменения момента сопротивления образцов кускового торфа в зависимости от соотношения диаметров d/D был произведен расчет, приведенный в табл. 1. Результаты расчета теоретических зависимостей $W_x = f(d/D)$ наглядно продемонстрированы на рис. 2.

Таблица 1. Расчет моментов сопротивления сечения трубчатого кускового торфа W_x в зависимости от соотношения внутреннего и наружного диаметров d/D

D , мм	d , мм	d/D	$1 - \left(\frac{d}{D}\right)^4$	$W_x \cdot 10^6$, м ³	D , мм	d , мм	d/D	$1 - \left(\frac{d}{D}\right)^4$	$W_x \cdot 10^6$, м ³
60	6	0,1	0,9999	21,204	140	14	0,1	0,9999	269,364
	12	0,2	0,9984	21,166		28	0,2	0,9984	268,879
	18	0,3	0,9919	21,034		42	0,3	0,9919	267,209
	24	0,4	0,9744	20,727		56	0,4	0,9744	262,495
	30	0,5	0,9375	19,881		7	0,5	0,9375	252,554
	36	0,6	0,8704	18,458		84	0,6	0,8704	234,478
	42	0,7	0,7599	16,114		98	0,7	0,7599	204,710
	56	0,8	0,5904	12,520		112	0,8	0,5904	159,048
	54	0,9	0,3439	7,293		126	0,9	0,3439	92,644
80	8	0,1	0,9999	50,260	160	16	0,1	0,9999	402,084
	16	0,2	0,9984	50,185		32	0,2	0,9984	401,360
	24	0,3	0,9919	49,858		48	0,3	0,9919	398,867
	32	0,4	0,9744	48,858		64	0,4	0,9744	391,830
	40	0,5	0,9375	47,123		80	0,5	0,9375	376,991
	48	0,6	0,8704	43,751		96	0,6	0,8704	350,009
	56	0,7	0,7599	38,196		112	0,7	0,7599	305,574
	64	0,8	0,5904	29,676		128	0,8	0,5904	237,414
	72	0,9	0,3439	17,286		144	0,9	0,3439	138,290
100	10	0,1	0,9999	98,165	180	18	0,1	0,9999	572,498
	20	0,2	0,9984	98,018		36	0,2	0,9984	571,467
	30	0,3	0,9919	97,380		54	0,3	0,9919	567,917
	40	0,4	0,9744	95,662		72	0,4	0,9744	557,898
	50	0,5	0,9375	92,039		90	0,5	0,9375	536,770
	60	0,6	0,8704	85,452		108	0,6	0,8704	498,352
	70	0,7	0,7599	74,603		126	0,7	0,7599	435,085
	80	0,8	0,5904	57,963		144	0,8	0,5904	338,036
	90	0,9	0,3439	33,762		162	0,9	0,3439	196,902
120	12	0,1	0,9999	169,629	200	20	0,1	0,9999	785,319
	24	0,2	0,9984	169,375		40	0,2	0,9984	783,906
	36	0,3	0,9919	168,272		60	0,3	0,9919	779,036
	48	0,4	0,9744	165,303		80	0,4	0,9744	767,648
	60	0,5	0,9375	159,043		100	0,5	0,9375	736,311
	72	0,6	0,8704	147,660		120	0,6	0,8704	683,610
	84	0,7	0,7599	128,914		140	0,7	0,7599	596,824
	96	0,8	0,5904	100,159		160	0,8	0,5904	463,699
	108	0,9	0,3439	58,341		180	0,9	0,3439	270,098

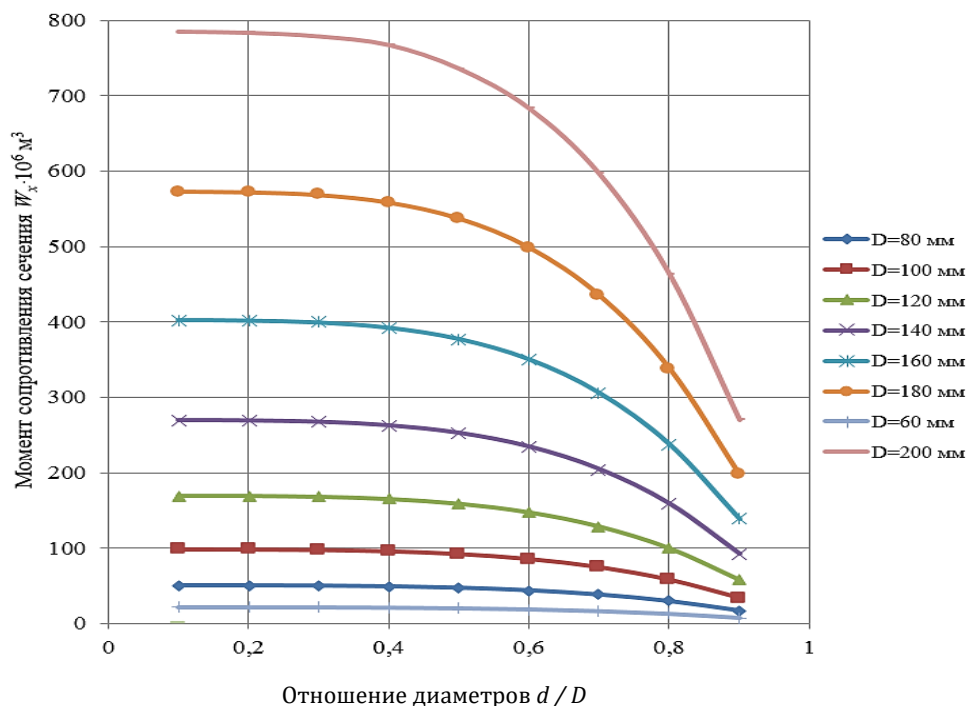


Рис. 2. Зависимость момента сопротивления трубчатого кускового торфа от соотношения внутреннего и наружного диаметров

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Анализ полученных зависимостей (см. рис. 2) позволяет сделать следующие выводы. Очевидно, что должны быть отброшены ряды с $d/D = 0,9$ и $d/D = 0,1$ как невозможные в изготовлении из-за весьма низкой прочности куска (по сути, торфяной кусок с $d/D = 0,9$ можно представить даже не как кольцо или трубу, а как тонкостенную оболочку, прочность которой явно недостаточна) и из-за весьма низкой прочности внутреннего стержня в мундштуке, служащего для пустообразования (для $d/D = 0,1$). В рядах с $d/D = 0,2 \dots 0,8$ четко прослеживается увеличение интенсивности падения момента сопротивления сечения при $d/D > 0,4$. Поэтому, по соображениям прочности на изгиб, не имеет смысла проектировать механизмы, формирующие трубчатые куски с соотношением диаметров $d/D > 0,4$. Следует ограничиться зоной $0,2 \leq d/D \leq 0,4$.

В работе [24] методом множителей Лагранжа установлено, что лучшим с технологической точки зрения является круглое сечение торфяного куска, а из условия минимума боковой поверхности при заданном объеме куска получено, что длина куска должна быть равна диаметру. При этом для полнотелого брикета из штемпельного пресса Б-8232 рекомендована высота 60...70 мм.

В монографии [25] показано, что для равномерности протекания процессов сушки в полевых условиях, когда испарение происходит из всего объема куска, диаметр последнего должен быть равен 30...40 мм.

В обоих случаях размер диаметра куска можно трактовать, как толщину стенки. Можно сделать вывод о том, что с позиций равномерного испарения влаги и технологичности толщина стенки куска трубчатого сечения должна быть равна 40...60 мм.

Принимая во внимание, что b (толщина стенки куска) рассчитывается по формуле

$$b = \frac{D-d}{2}, \quad (5)$$

а $0,2 \leq d/D \leq 0,4$ (как это было выяснено ранее), можно составить таблицу рекомендуемых размеров куска, исходя из требований прочности на изгиб, технологичности и равномерности сушки (табл. 2).

Таблица 2. Рекомендуемые размеры куска формованного торфа

b , мм	d/D	D , мм	d , мм
40	0,2	100,0	20,0
	0,3	114,3	34,3
	0,4	133,3	40,0
50	0,2	125,0	25,0
	0,3	142,9	42,9
	0,4	166,7	66,7
60	0,2	150,0	30,0
	0,3	171,4	51,4
	0,4	200,0	80,0

Теоретически полученные рациональные соотношения диаметров и их точные значения требуют дальнейшей экспериментальной проверки качества формования, которую предстоит выполнить в лабораторных условиях.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате работы были теоретически обоснованы рациональные соотношения диаметров и получены их значения для торфяного куска трубчатой формы. При этом учитывались следующие требования: прочность куска на изгиб, технологичность и равномерность сушки в полевых условиях. Данное исследование является лишь частью большой работы по научному обоснованию параметров торфяного куска трубчатой формы и режимов его формования, которая будет продолжена.

ЛИТЕРАТУРА

1. Misnikov O. Basic Technologies and Equipment Used for Peat Deposits Development in Foreign Countries // *E3S Web of Conferences* «III-d International Innovative Mining Symposium». 2018. V. 41. P. 01046.
2. Панов В.В., Мисников О.С., Купорова А.В. Проблемы и перспективы развития торфяного производства в Российской Федерации // *Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал)*. 2017. № 5. С.105–117.
3. Справочник по торфу / И.Ф. Ларгин, С.С. Корчунов, Л.М. Малков [и др.]; редкол.: А.В. Лазарев, С.С. Корчунов (науч. редакторы) [и др.]. М.: Недра, 1982. 760 с.
4. Терентьев А.А., Суворов В.И. Структура и свойства формованной торфяной продукции. Тверь: Созвездие, 2004. 136 с.
5. Булышко М.Г., Иванов В.Н., Сарматов М.И. Брикетирование торфа. М.: Госэнергоиздат, 1962. 303 с.
6. Семенский Е.П. Технический анализ торфа. М.: Недра, 1966. 232 с.

7. Kremcheev E.A., Kremcheeva D.A. Technological Approaches to Reducing the Loss of Peat Raw Materials in Fields with Hydrological Regime // *Indian Journal of Science and Technology*. 2016. V. 9. № 12. P. 89525.
8. Яблонев А.Л., Гусева А.М. Определение энергоемкости процесса формования кускового торфа // *Вестник Тверского государственного технического университета. Серия «Технические науки»*. 2019. № 1(1). С. 36–45.
9. Яблонев А.Л., Гусева А.М. Экспериментальное обоснование рациональных режимов производства кускового торфа // *Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал)*. 2019. № 2. С. 163–171.
10. Яблонев А.Л., Гусева А.М. Анализ параметров и режимов работы формующего агрегата машин для добычи кускового торфа с позиции обеспечения качества получаемого продукта // *Горный журнал*. 2022. № 5. С. 52–57.
11. Яблонев А.Л., Гусева А.М. Определение прочности на изгиб формованной торфяной продукции // *Вестник Тверского государственного технического университета. Серия «Технические науки»*. 2019. № 3 (3). С. 47–55.
12. Yablonev A., Guseva A. Method of Expanding Measurement Limits of Digital Dynamometer in Testing Strength of Moulded Peat Products // *E3S Web of Conferences. EDPSciences*. 2020. V. 174. P. 01035.
13. Яблонев А.Л. Формы сечений кускового торфа и его прочность на изгиб // *Вестник Тверского государственного технического университета. Серия «Технические науки»*. 2024. № 4 (24). С. 29–36.
14. Селеннов В.Г., Петров Ю.О., Юрков В.М. Нереализованные разработки института // *Торф и Бизнес*. 2006. № 3 (5). С. 23–27.
15. Федоров А.С. Обоснование и выбор параметров формователя окускованного торфа трубчатого типа шнекового пресса стилочной машины; дис. ... канд. техн. наук. СПб., 2021. 195 с.
16. Федоров А.С., Казаков Ю.В., Фадеев Д.В. Параметры мундштука шнекового пресса с учетом требований к торфяной формованной продукции // *Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал)*. 2020. № S9. С. 3–15.
17. Федоров А.С., Михайлов А.В., Гарифуллин Д.Р. Механическая переработка торфяного сырья при формовании в составном мундштуке шнекового пресса // *Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал)*. 2020. № S44. С. 3–13.
18. Михайлов А.В., Федоров А.С. Анализ условий полевого производства окускованной торфяной продукции // *Машины, агрегаты и процессы. Проектирование, создание и модернизация: Материалы международной научно-практ. конф.* СПб.: СПбФ НИЦ МС, 2018. № 1. С. 146–147.
19. Михайлов А.В., Федоров А.С. Направления интенсификации сушки торфяной окускованной продукции в полевых условиях // *Автоматизированное проектирование в машиностроении*. 2018. № 6. С. 6–8.
20. Тимофеева Д.В., Попов В.П., Антимонов С.В., Зинюхина А.Г. Разработка конструкции шнека типового пресс-экструдера // *Вестник ОГУ*. 2014. № 9. С. 220–225.
21. Соколов М.В., Клинков А.С., Ефремов О.В., Беляев П.С., Однолько В.Г. Автоматизированное проектирование и расчет шнековых машин: монография. М.: Машиностроение-1, 2004. 248 с.
22. Степин П.А. Сопротивление материалов. М.: Высшая школа, 1988. 367 с.
23. Таблица. Изгиб. Осевые моменты инерции сечений (статические моменты сечений), осевые сопротивления и радиусы инерции плоских фигур. URL:

<https://dpva.xyz/Guide/GuideMatherials/MaterialsResistant/MomentsOfInertion/>(дата обращения: 14.08.2024).

24. Богатов Б.А. Управление процессом разработки торфяных месторождений. Монография. Мн.: Вышэйшая школа, 1985. 168 с.

25. Афанасьев А.Е., Чураев Н.В. Оптимизация процессов сушки и структурообразования в технологии торфяного производства: монография. М.: Недра, 1992. 288 с.

Для цитирования: Яблонев А.Л. Теоретическое обоснование рациональных параметров торфяного куска трубчатой формы // Вестник Тверского государственного технического университета. Серия «Техническиенауки». 2025. № 1(25). С. 32–39.

THEORETICAL JUSTIFICATION OF RATIONAL PARAMETERS OF A TUBULAR SOD PEAT

A.L. YABLONEV, Dr. Sc.

Tver State Technical University
22, Af. Nikitin emb., Tver, 170026, e-mail: alvovich@mail.ru

The tubular form of sod peat is rightfully considered the most promising, since it has a larger moisture evaporation area, ignites better and burns more stably in solid fuel boilers. Such sod is characterized by such parameters as the outer diameter, inner diameter, length. Naturally, questions arise about the parameters, that can be called rational or optimal, according to the criteria of bending strength, manufacturability and uniformity of drying. This article attempts to answer these questions theoretically. Recommended rational ratios of diameters and the diameters of peat pieces themselves are given. It is noted, that the necessary experimental verification of the obtained results in laboratory conditions is assumed.

Keywords: sod peat, bending strength, tubular cross-sectional shape of the sod, bending moment, wall thickness of the sod, drying time of the sod, breaking load.

Поступила в редакцию/received: 16.11.2024; после рецензирования/revised: 27.11.2024;
принята/accepted: 12.12.2024

УДК 622.332: 622.271.45

ОБОСНОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИИ КОМПЛЕКСНОГО ОСВОЕНИЯ ТЕХНОГЕННЫХ МЕСТОРОЖДЕНИЙ БУРОГО УГЛЯ

Л.В. ЛОБАЧЕВА, канд. техн. наук

Тверской государственный технический университет
170026, Тверь, наб. Аф. Никитина, 22, e-mail: firslud@mail.ru

© Лобачева Л.В., 2025

Рассмотрены основные подходы к разработке геотехнологий комплексного освоения техногенных месторождений добычи бурого угля. Обоснованы технологические принципы комплексного освоения месторождений бурого угля. Представлены