ISSN 2224-1523

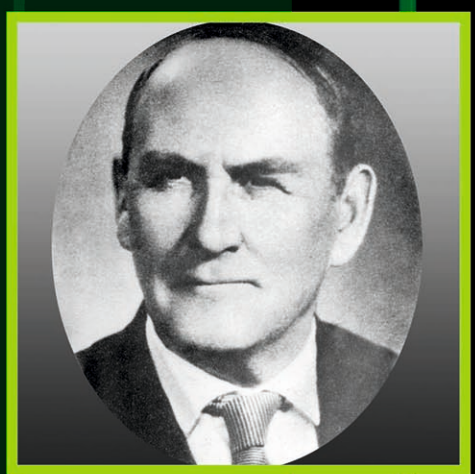
Научный журнал

Восточно-Европейского института торфяного дела
Тверского государственного технического университета

ИНСТОРФ

№12 (65) 2015

ТРУДЫ ИНСТОРФА



Министерство образования и науки РФ

Восточно-Европейский институт торфяного дела
Тверского государственного технического университета

ТРУДЫ ИНСТОРФА

Научный журнал

Издается с апреля 1922 года
Выходит два раза в год

№ 12 (65)
июль–декабрь 2015 г.

Тверь 2015

УДК 622.331(05)
ББК 26.343.4я5

Труды Инсторфа: научный журнал. № 12 (65) (июль–декабрь 2015 г.). Тверь: ТвГТУ, 2015. 46 с.

Учредитель и издатель: Тверской государственный технический университет

Главный редактор
проф., д. ф.-м. н. А.В. Твардовский

Научный редактор
акад. НАНБ, д. т. н. И.И. Лиштван

Редакционный совет:
проф., д. т. н. А.Н. Васильев;
проф., д. т. н. В.И. Горячев; проф., д. т. н. Н.В. Гревцев;
чл.-корр. РАН, д. с-х. н. Л.И. Инишева;
проф., д. т. н. Б.Ф. Зюзин (*зам. научного редактора)*;
проф., д. т. н. Н.В. Кислов; проф., д. т. н. А.В. Кондратьев;
проф., д. х. н. Ю.Ю. Косивцов;
проф., д. т. н. В.И. Косов; проф., д. б. н. О.Л. Кузнецов;
проф., д. б. н. Е.Д. Лапшина;
проф., д. т. н. Б.И. Масленников;
проф., д. т. н. А.В. Михайлов;
проф., д. т. н. В.А. Миронов;
проф., д. т. н. Б.В. Палюх; проф., д. т. н. В.Г. Селеннов;
проф., д. т. н. В.Ф. Синицин; д. б. н. А.А. Сирин;
проф., д. х. н. Э.М. Сульман; д. б. н. Т.К. Юрковская;
доц., д. т. н. А.Л. Яблонев

Редакционная коллегия:
проф., д. т. н. С.Н. Гамаюнов;
проф., д. т. н. Ю.Н. Женихов;
доц., д. т. н. О.С. Мисников;
доц., д. г. н. В.В. Панов (*зам. главного редактора*);
доц., д. т. н. К.В. Фомин

Секретарь редакционной коллегии
к. т. н. А.Е. Тимофеев

Технический редактор к. т. н. В.В. Кузовлев

Свидетельство о регистрации
Эл № ФС 77-41964 выдано 9.09.2010 г.
Федеральной службой Роскомнадзор

Редактор О.В. Чеховская
Корректор Т.С. Самборская

Технический редактор А.Ю. Соколова

Подписано в печать 29.12.15 г.
Формат 60×84 1/8. Усл. печ. л. 6,4.
ООО «Издательство «Триада»
170034, г. Тверь, пр. Чайковского, д. 9, оф. 514

ISSN 2224-1523

© Тверской государственный технический университет, 2015

СОДЕРЖАНИЕ

Мисников О.С., Иванов В.А.

Исследование влияния композиционных гидрофобных добавок на основе торфа на свойства портландцемента 3

Королев И.О., Пухова О.В.

Прибор и методика ускоренного определения дисперсности формованного торфа 13

Вележева С.И., Цветков И.В.

Изменение зольности сырья для брикетирования в процессе сушки..... 18

Густова Х.О., Купорова А.В.

Определение резерва при невыполнении плановых показателей добычи торфа 23

Фомин К.В., Жигульская А.И.

Инженерная методика анализа динамических нагрузок в элементах привода машин глубокого фрезерования.... 27

Яблонев А.Л., Скориков А.Ю.

Деформирование торфяной залежи штампами и ходовыми устройствами машин в свете общей теории механики грунтов 33

Копенкина Л.В.

В.Е. Раковский (1900–1988) – основатель научной школы химической технологии торфа (к 115-летию со дня рождения) 41

УДК 666.96.15

Мисников О.С.

Мисников Олег Степанович, д. т. н., зав. кафедрой геотехнологии и торфяного производства Тверского государственного технического университета» (ТвГТУ). Тверь, Академическая, 12. oleg.misnikov@gmail.com

Иванов В.А.

Иванов Валерий Андреевич, аспирант ТвГТУ. Тверь, Академическая, 12, geek_rzev@mail.ru

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ КОМПОЗИЦИОННЫХ ГИДРОФОБНЫХ ДОБАВОК НА ОСНОВЕ ТОРФА НА СВОЙСТВА ПОРТЛАНДЦЕМЕНТА

Аннотация. В работе проведен критический анализ применения метода гидрофобной модификации цемента торфяными добавками в условиях действующих при его промышленном производстве технологических процессов. Обозначены перспективы использования метода в технологии получения гипсового вяжущего. Проведено обоснование изготовления комплексных гидрофобно-модифицирующих добавок на основе торфа с их последующим помолом с компонентами клинкера. Определены основные преимущества и недостатки экспериментальных составов модифицированного цемента. Снижение прочности экспериментальных образцов вызвано высоким содержанием воздуха в цементном тесте, что связано с недостатком существующих методик испытаний. Использование пеногасящих компонентов в комплексных гидрофобно-модифицирующих добавках позволяет производить цемент, полностью соответствующий требованиям современных стандартов.

Ключевые слова: торф, битум, цемент, гипс, гидрофобизация, модификация, сорбция, комплексная добавка, воздухововлечение, пористость, пеногаситель.

Misnikov O.S.

Misnikov Oleg S., Prof., Head of Chair of Geotechnology and Peat Production of the Tver StateTechnical University. Tver, Academicheskaya, 12

Ivanov V.A.

Ivanov Valeryi A. PhD student Tver State Technical University. Tver, Academicheskaya, 12

STUDY OF EFFECT OF COMPOSITE HIDROPHOBIC PEAT-BASED ADDITIVES ON PROPERTIES OF PORTLAND CEMENT

Abstract. The study gives a critical analysis of the boundaries of the method of cement hydrophobic modification with peat-based additives under conditions of technological processes of its industrial production. The perspectives of this method for gypsum binder obtaining were defined. The study substantiates manufacturing of complex hydrophobic-modifying additives based on peat with their subsequent grinding with clinker components. We pointed out main advantages and disadvantages of experimental compositions of the modified cement. Decrease in durability of experimental samples is caused by a high content of air in cement paste, which is connected with disadvantages of existing test methods. The use of defoaming components in complex hydrophobic modifying additives allows producing the cement, which fully complies with modern standards.

Key words: peat, bitumen, cement, gypsum, hydrophobization, modification, sorption, complex additive, air entrainment, porosity, defoaming agent

Метод гидрофобизации минеральных дисперсных материалов модификаторами, выделяемыми из торфяного сырья, основан на термическом выделении легкоподвижных битумов из органического вещества торфа и их сорбционного нанесения на обрабатываемую поверхность [1]. На настоящий момент имеется достаточно большое количество публикаций [2], показывающих положительное влияние гидрофобизации на характеристики модифицируемых материалов, а также вероятные направления их использования в промышленности. Тем не менее, основным сдерживающим фактором их применения в промышленном производстве являются подходы, связанные с необходимостью осуществления реакторного процесса. А это возможно только в тех случаях, когда научно обосновано и технологически осуществимо совмещение двух или более процессов, а также использование традиционно применяемого в отрасли оборудования. Например, при получении гипсового вяжущего возможно совмещение процесса обжига двуводного гипса и термохимической деструкции торфа в одном агрегате – варочном котле [3]. При этом после удаления воды из частиц гипса на их поверхность будет осаждаться образующийся при термическом разложении органического вещества торфа битум.

Перспективы применения метода в других областях связаны с необходимостью соблюдения действующих стандартов и минимизации издержек производства. Это показательно при анализе научно-исследовательских работ, выполненных для обоснования возможности применения гидрофобно-модифицирующих добавок при производстве портландцемента. Главной проблемой здесь является ограниченное стандартами [4, 5] содержание органических добавок (0,3…0,5 %), вносимых в минеральное вяжущее при помоле клинкера. В способе получения модельного гидрофобно-модифицированного цемента [1] это требование выполняется. Переход же к условиям реально действующих технологических процессов приводит к тому, что концентрация гидрофобно-модифицирующей добавки (ГМД), для появления устойчивого водоотталкивающего эффекта должна составлять не менее 2% [2]. Причем в ряде случаев такая концентрация приводит к ухудшению некоторых физико-химических характеристик минерального вяжущего материала.

Одним из возможных путей решения этой проблемы является получение композиционных ГМД, в которые для усиления гидрофобного эффекта в торфяную матрицу могли бы вноситься традиционные гидрофобные добавки [6]. Использование многих из них в отдельности проблематично из-за предельно низких концентраций и связанной с этим необходимости точного дозирования, равномерности распределения в порошке и т. п. Такими добавками являются мылонафт, асидол, олеиновая кислота, кремнийорганические жидкости, «сырой» торфяной битум, модифицированный воск [7] и другие известные гидрофобизаторы. Известно, что при введении гидрофобизирующих добавок в цемент, а также растворные или бетонные смеси возникают следующие эффекты [6]:

- значительное ухудшение смачиваемости цемента водой;
- гидрофобизация бетона и, как следствие, снижение скорости капиллярного подсоса влаги, что благоприятно влияет на его долговечность;
- более сильное, чем при использовании гидрофилизирующих поверхностно-активных добавок, вовлечение воздуха в систему.

Одной из операций по получению торфяных модифицирующих добавок является механическое диспергирование материала. При переработке в торфе происходят изменения, которые нарушают его первоначальную структуру. Известно, что от вида и интенсивности воздействия на органическое вещество может меняться и химический состав материала. В большинстве случаев переработка торфа связана с пятью известными видами (или их комбинированием) механического воздействия на материал. Но, как правило, механическая переработка уменьшает размеры грубодисперсных фракций торфа, не меняя или почти не изменяя его химических свойств. В то же время применение высокоэнергетических методов механического воздействия на органическое вещество позволяет придавать продуктам переработки новые свойства. К таким методам можно, например, отнести помол торфа в шаровой мельнице или высокоскоростном двухроторном измельчителе – устройствах, в которых локальная температура в зоне контакта частиц с рабочим органом может достигать значений, соответствующих предпиролизным или пиролизным процессам.

Применительно к рассматриваемым методам гидрофобной модификации механическое диспергирование оказывает, в основном, положительное воздействие. Однако если рассматривать торфяную матрицу с точки зрения ее сорбционной емкости, то диспергирование однозначно будет уменьшать ее пористость и, следовательно, поглотительную способность. В этом случае необходима экспериментальная оценка массовой доли ингредиентов, которые предполагается вносить в торф с учетом их индивидуальных свойств, а также свойств композиционной ГМД (влажность, сыпучесть, плотность, внешний вид и т. п.)

В экспериментах осуществлялся помол частиц торфа до размеров менее 100 мкм (рис. 1). Первичный анализ поверхности частицы позволяет обнаружить на ней открытые поры, сколы и другие дефекты, которые могут обеспечивать быстрое поглощение жидких гидрофобизаторов.

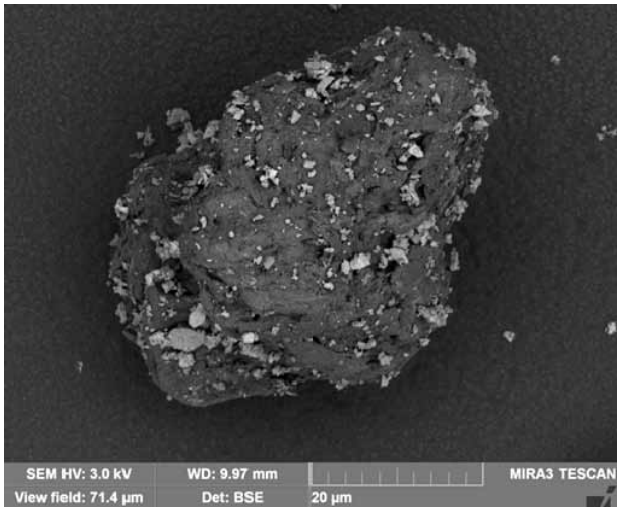


Рис. 1. Электронно-микроскопический снимок частицы торфа размером около 40 мкм после механического диспергирования

Fig. 1. An electron micrograph of a peat particle of the size of about 40 microns after mechanical dispersion

Более детальный анализ на растровом электронном микроскопе [8] скола торфяной частицы при сравнительно больших увеличениях (рис. 2) показывает разветвленное пористое пространство, обеспечивающее возможность сорбции гидрофобизаторов на водной основе, органических растворов и в «чистом» виде.

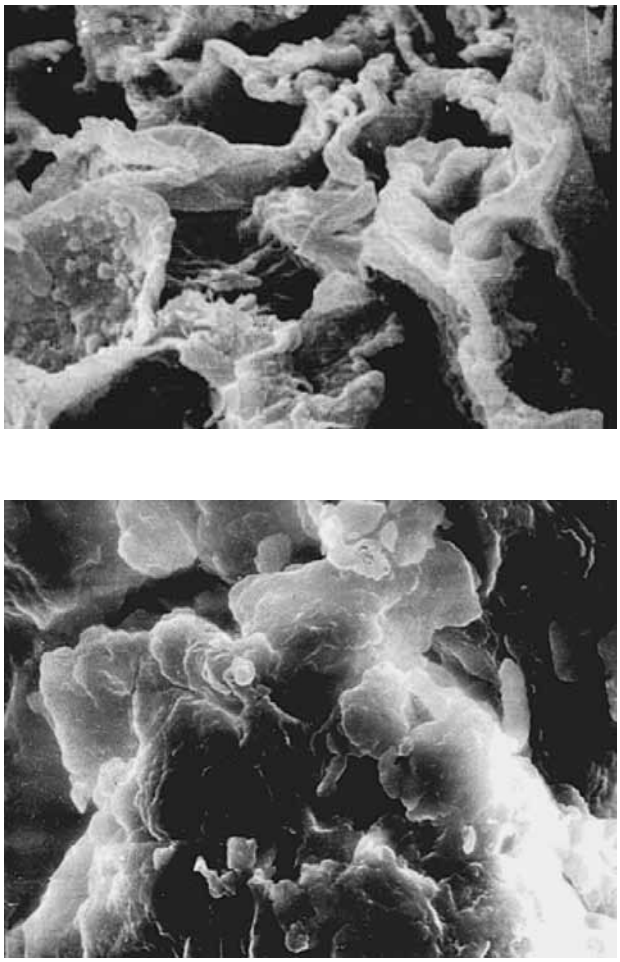


Рис. 2. Изображение во вторичных электронах структуры отдельного фрагмента торфяной частицы: слева – увеличение 3000-кратное; справа – 6000-кратное [8]

Fig. 2. Picture in secondary-electron mode of the structure of a separate piece of peat particles: Up – 3000-fold magnification; Down – 6000-fold magnification [8]

Экспериментально установлено, что сорбционной емкости органического вещества торфа будет достаточно для поглощения, связывания и удерживания на поверхности и внутри частицы традиционных гидрофобных соединений в широком диапазоне концентраций. Например, при внесении олеиновой кислоты и ГКЖ-94 в торфяную матрицу, сформированную из верхового и низинного торфа степенью разложения 30%, возможно достижение массовых концентраций до 20% без потери сыпучести ГМД. Если технологически будут обоснованы более высокие концентрации активного компонента, возможно изменение сырьевой базы для их получения в сторону уменьшения степени разложения торфа.

В связи с этим, следующей задачей работы является оценка возможности применения композиционных гидрофобно-модифицирующих добавок на основе торфа и традиционных гидрофобизаторов при производстве портландцемента и строительных материалов на его основе [9][1].

Экспериментальные исследования проводились со следующими видами добавок:

- ГМД-0 – диспергированный и термомодифицированный торф[2];
- ГМД-10 (К) – композиция ГМД-0 (90%) с этилгидросилоксаном ГКЖ-94 (10%);
- ГМД-15 (К) – композиция ГМД-0 (85%) с этилгидросилоксаном ГКЖ-94 (15%);
- ГМД-20 (ОК) – композиция ГМД-0 (80%) с олеиновой кислотой (20%).

В экспериментах использовался клинкер и гипсовый камень, производимый и используемый на предприятии ЗАО «Осколцемент» (г. Старый Оскол, Белгородская область). После предварительного дробления в щековой дробилке до размеров частиц менее 5 мм клинкер и гипсовый камень, взвешенные на электронных весах с погрешностью не более 0,1 г, загружались в шаровую мельницу. Гидрофобно-модифицирующие добавки также взвешивались на электронных весах с погрешностью не более 0,01 г и загружались в мельницу в соответствии с дозировкой, указанной в табл. 1. Затем в мельницу загружались мелющие тела (шары) массой 20 кг (из соотношения «материал: мелющие тела» 1:4).

Измельчение материалов производилось до получения на эталонном составе цемента (табл. 1, состав 1) удельной поверхности 320…340 м²/кг. Продолжительность помола для всех последующих составов (с добавками) принята равной 1 час 50 мин – время достижения эталонным составом требуемой удельной поверхности[3].

На начальном этапе исследований определялась тонкость помола цементов, их истинная плотность, удельная поверхность и степень гидрофобности. Определение тонкости помола проб цемента осуществлялось по остатку на сите с ячейкой 0,08 мм с использованием прибора механического просеивания [10]. Перед испытаниями каждая проба цемента пропускалась через сито с ячейкой 0,9 мм и перемешивалась до однородного распределения мелких частиц. Контрольное просеивание выполнялось вручную над листом бумаги в течение 1 мин. Операция просеивания считалась законченной, если сквозь сито проходило менее 0,01 г цемента.

Таблица 1. Состав получаемых цементов

Table 1. Composition of produced cement

Состав	Материалы				
	клинкер, г (95%)	гипсовый камень, г (5%)	Вид добавки	Содержание добавки	
				%	г
1	4750	250	–	–	–
2	4750	250	ГМД-0	3,0	150
3	4750	250	ГМД-0	2,0	100
4	4750	250	ГМД-0	1,0	50
5	4750	250	ГМД 10 (К)	0,3	15
6	4750	250	ГМД 15 (К)	0,3	15
7	4750	250	ГМД-20 (ОК)	0,2	10
8	4750	250		0,3	15

Истинная плотность цемента определялась при помощи прибора Ле Шателье [10]. В прибор, наполненный до нулевой отметки обезвоженным керосином, небольшими равномерными порциями загружали 65 г испытуемого цемента. После удаления пузырьков воздуха из прибора определяли уровень жидкости в пределах верхней градуированной части прибора.

Истинная плотность цемента, $\rho_ц$, г/см³, вычислялась по формуле

$$\rho_ц = \frac{m_ц}{V},$$

где $m_ц$ – масса навески цемента, г; V – объем керосина, вытесненного цементом, см³.

Плотность цемента принималась по среднеарифметическому значению результатов двух параллельных определений, округленному до 0,01 г/см³. Определение удельной поверхности полученных проб цемента осуществлялось на приборе ПСХ-11 MSP.

1. Для анализа использовались экспериментальные данные, полученные в испытательном центре «Академстройиспытания» Ростовского государственного строительного университета.

2. Характеристики торфяного сырья, параметры термомодификации и способ внесения традиционных гидрофобизаторов в торфяную матрицу являются секретом производства и в статье не приводятся.

3. В ранее проводимых экспериментах время помола до таких же значений удельной поверхности сокращалось до 24…45 минут, что связано с конструктивными особенностями и параметрами работы конкретных шаровых мельниц.

Гидрофобность порошка оценивалась по времени удержания капли на поверхности цемента [5]. Проба испытуемого цемента ровным слоем засыпалась в чашку Петри. Половина площади поверхности материала уплотнялась и выравнивалась стеклянной пластиной, а другая половина поверхности цемента оставалась в рыхлом состоянии. На обе поверхности наносилось по пять капель воды и фиксировалось время их удержания.

Сводная ведомость результатов испытаний приведена в табл. 2.

Анализ данных, представленных в табл. 2, позволяет сделать следующие выводы:

- устойчивый гидрофобный эффект в цементах, а также интенсификация процесса помола (как минимум на 5%) при использовании добавки ГМД-0 появляется только при концентрациях более 2%;
- все остальные обогащенные добавки придают цементу гидрофобные свойства при концентрациях 0,2…0,3%, что соответствует (равно как и другие показатели, отраженные в табл. 2) ГОСТ 10178-85.

Следующая серия экспериментов была направлена на оценку влияния гидрофобно-модифицирующих добавок на физико-механические характеристики полученных цементов (цементных растворов). Для этого были проведены испытания прочности при сжатии ($R_{сж}$) и изгибе ($R_{изг}$) балочек из цементно-песчаного раствора в возрасте 2, 7, 28, 56 суток; определение равномерности изменения объема (расширение), нормальной густоты ($H_г$) и сроков схватывания цементного теста.

Определение характеристик цементов, полученных методом совместного помола с добавками ГМД, осуществлялось по методикам [10].

Прочность при изгибе $R_{изг}$, МПа, отдельного образца-балочки вычислялась по формуле:

$$R_{изг} = \frac{1,5\,F\,l}{b^3},$$

где F – разрушающая нагрузка, Н; l – расстояние между осями опор, мм, b – размер стороны квадратного сечения образца-балочки, мм. Средняя скорость нарастания нагрузки на испытываемый образец составляла 50 ± 10 Н/с.

С полученными после экспериментов на изгиб половинками образцов сразу же проводили испытания на одноосное сжатие. В этом случае половинка образца-балочки помещалась между нажимными пластинами таким образом, чтобы его грани, горизонтальные при изготовлении, находились в вертикальном положении. Средняя скорость нарастания нагрузки на образец при сжатии выдерживалась в районе 2400 ± 200 Н/с.

Прочность на сжатие $R_{сж}$, МПа, отдельной половинки образца вычислялась по формуле:

$$R_{сж} = \frac{F}{S},$$

где F – разрушающая нагрузка, Н; S – площадь рабочей поверхности нажимной пластинки, мм^2.

Анализ результатов экспериментов показывает, что присутствие всех испытываемых гидрофобно-модифицирующих добавок приводит к увеличению сроков начала и конца схватывания, а также нормальной густоты, что согласуется с ранее полученными данными [2]. В соответствии с требованиями [6] начало схватывания цемента должно наступать не ранее 45 мин, а конец – не позднее

Таблица 2. Сводная ведомость результатов испытаний экспериментальных цементов

Table 2. Summary of test results of the experimental cements

Состав[4]	Остаток на сите 008, %	Тонкость помола, %	Истинная плотность, кг/м^3	Удельная поверхность, м^2/кг	Средний размер частиц, мкм	Время удержания капли, мин, на поверхности	
						гладкой	рыхлой
1	1,91	98,1	3160	3348	5,85	0	0
2	1,56	98,4	3070	3521	5,72	>20,0	>15,0
3	0,84	99,2	3100	3511	5,51	>5,0	>5,0
4	2,36	97,6	3120	3363	5,81	<0,5	<0,5
5	1,95	98,0	3130	3360	5,87	>5,0	>5,0
6	1,93	98,1	3130	3411	5,77	>20,0	>15,0
7	1,91	98,1	3140	3356	5,79	>15,0	>15,0
8	1,93	98,1	3130	3408	5,81	>20,0	>20,0

4. Здесь и далее номера составов соответствуют номерам в таблице 1.

10 ч от начала затворения раствора. В то же время ГОСТ 31108-2003 [5] определяет начало схватывания цемента не ранее 60 мин, а конец схватывания вообще не регламентируется. Таким образом, все исследуемые составы соответствуют требованиям ГОСТ 31108-2003 по срокам начала и конца схватывания (табл. 3).

Необходимо отметить, что присутствие всех исследованных видов ГМД в системе оказывает негативное влияние на кинетику набора прочности, а также на величину самой прочности образцов цемента. Методика приготовления цементно-песчаного раствора и цементного теста предусматривает использование высокоскоростного смесителя с дозирующим устройством. Выполнение операций по перемешиванию цемента с водой и цементного раствора, а также их длительность приводят к вовлечению в испытываемую систему воздуха. Более того, известно [11] что воздухововлекающий эффект усиливается при использовании различных видов органических битумосодержащих добавок.

Для оценки воздействия вовлеченного воздуха на прочность твердеющей системы был проведен ряд экспериментов по определению средней и дополнительной пористости образцов.

Средняя плотность цементно-песчаного раствора определялась на образцах, высушенных до постоянной массы при температуре 105 °С.

Пористость образцов P, %, рассчитывалась по формуле

$$P = \left(1 - \frac{\rho_{ср}}{\rho_{и}}\right) \cdot 100\%,$$

где $\rho_{ср}$ и $\rho_{и}$ – соответственно средняя и истинная плотность, г/см^3.

Дополнительная пористость ΔP, %, была определена относительно эталонного состава по формуле

$$\Delta P = \frac{\rho_{ср\,э} - \rho_{ср\,д}}{\rho_{и}} \cdot 100\%,$$

где $\rho_{ср\,э}$ и $\rho_{ср\,д}$ – соответственно средняя плотность эталонного состава и состава с добавкой, г/см^3.

В результате проведения исследований было зафиксировано увеличение пористости и, соответственно, дополнительной пористости в гидрофобно-модифицированных цементах (табл. 4). Количественные показатели растут при увеличении концентраций добавок, однако качественно на приращение дополнительной пористости в образцах больше оказывают влияние добавки, обогащенные традиционными гидрофобными компонентами.

Необходимо обратить внимание на величину дополнительной пористости, получаемой при использовании различных добавок. Например, внесение при помоле клинкера термоактивированного торфа от 1 до 3% увеличивает дополнительную пористость цементного камня с 4,6 до 8,7%. В то же время внесение композиционных гидрофобных модификаторов в количестве 0,2…0,3% увеличивает пористость от 11,4 до 13,6%. Это свидетельствует о том что воздухововлекающий эффект традиционных модифицирующих составов в пересчете на действующее вещество на два порядка выше, чем у торфяного гидрофобизатора.

В работе был проведен анализ зависимости относительной прочности $R_{отн}$, %, от дополнительной пористости образцов.

Таблица 3. Исследование характеристик экспериментальных цементов

Table 3. Study of characteristics of the experimental cements

Состав	Нормальная густота, %	Сроки схватывания, мин		Прочность, МПа							
		начало	конец	2 суток		7 суток		28 суток		56 суток	
				$R_{изг}$	$R_{сж}$	$R_{изг}$	$R_{сж}$	$R_{изг}$	$R_{сж}$	$R_{изг}$	$R_{сж}$
1	26,75	200	225	5,8	21,9	8,6	38,3	9,9	51,3	10,4	57,5
2	32,5	1140	>1200		0	5,1	16,9	6,2	25,6	6,6	27,6
3	31,0	780	885		0	6,0	23,9	7,2	29,8	7,9	34,3
4	31,0	360	405	4,5	14,8	6,7	30,7	8,5	39,4	8,9	43,8
5	28,0	480	615	3,9	9,7	6,1	18,5	7,1	25,5	6,7	25,8
6	27,75	505	855	3,8	10,1	5,7	17,9	6,8	23,5	6,4	23,9
7	–	–	–	3,6	7,9	–	–	6,2	19,5	–	–
8	–	–	–	3,4	6,9	–	–	5,9	17,6	–	–

Таблица 4. Средняя плотность и дополнительная пористость образцов

Table 4. Average density and additional porosity of samples

Состав	Масса образца, г			Плотность средняя, кг/м³	Пористость *P*, %	Дополнительная пористость Δ*P*, %	Относительная прочность[5] $R_{отн}$, %	
	сухого на воздухе	влажного на воздухе	влажного в воде				изгиб	сжатие
1	278,3	297,9	167,5	2135	18,5	0	100	100
2	233,7	254,6	132,0	1906	27,3	8,7	62,6	49,9
3	148,4	268,8	141,3	1948	25,6	7,1	72,7	58,1
4	268,5	289,0	155,6	2013	23,2	4,6	85,9	76,8
5	235,2	255,4	125,1	1805	31,1	12,6	71,7	49,7
6	232,3	251,9	125,3	1835	30,0	11,4	68,7	45,8
7	231,1	257,6	129,1	1798	31,3	12,9	62,6	38,0
8	219,9	245,6	122,0	1779	32,1	13,6	59,6	34,3

$$R_{отн} = R_{max} / R_i = f(\Delta P),$$

где R_{max} – максимальная прочность контрольного образца, МПа; R_i – прочность экспериментального образца, МПа.

Результаты анализа (рис. 3) позволяют полностью подтвердить положение о негативном влиянии пористости на прочность цемента. Зависимость прочности от дополнительной пористости носит экспоненциальный характер с коэффициентами корреляции, близкими к единице.

Анализ имеющихся литературных источников, посвященных воздействию традиционных гидрофобизаторов на прочность цемента, свидетельствует о ряде противоречий с полученными ранее разными авторами экспериментальными данными. Например, в работах А.А. Алентьева, А.А. Пащенко и др. [11] проводились исследования влияния кремнийорганической жидкости ГКЖ-94 на прочность цемента. Гидрофобизатор в «чистом» виде вносился так же, как и в нашем случае, при помоле клинкера в концентрациях 0,04, 0,08 и 0,15%. При соотношении песка и цемента 3:1 и водоцементном отношении 0,45 во всех случаях наблюдался рост прочности образцов при их испытании на сжатие (табл. 5).

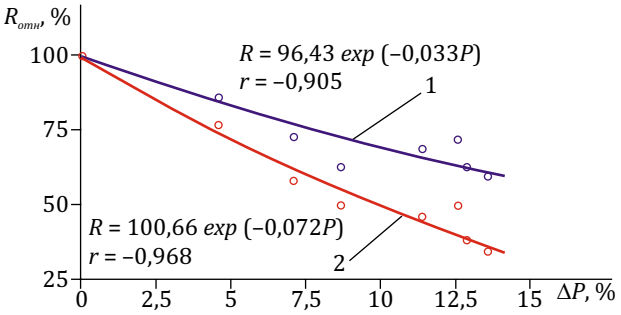


Рис. 3. Зависимость относительной прочности $R_{отн}$, %, на изгиб (1) и сжатие (2) и от дополнительной пористости Δ*P*, %, цементного раствора

Fig. 3. Dependence of relative strength R_{rel}, %, on bending (1) and compression (2) and on the additional porosity ΔP, %, cement grout

Таблица 5. Рост прочности цемента при использовании добавки ГКЖ-94 (по А.А. Пащенко [11])

Table 5. Increase of cement durability with use of the additives NGL-94 (in accordance with Pashchenko A.A. [11])

Возраст образцов	Относительная прочность при сжатии, %			
	Контрольный цемент	цементы с добавкой ГКЖ-94, %		
		0,04	0,08	0,15
3 суток	100	108	128	192
7 суток	100	111	123	168
28 суток	100	110	114	130

Примерно такие же выводы следуют и из работ М.И. Хигеровича [12]: активность свежеполученных цементов, определяемая при испытаниях по показателям прочности при сжатии в ряде экспериментов, увеличивалась на 5…13% по сравнению с контрольным образцом, а в некоторых уменьшалась на 5…10%, то есть в среднем не изменялась (табл. 6). Автор отмечал замедление набора прочности в гидрофобных цементах на ранних сроках твердения. Аналогичные колебания прочности

5. Прочность определялась в 28-суточном возрасте

наблюдались и во всех других экспериментах с цементами, полученными из различных видов клинкера и с использованием высокопроизводительного помольного оборудования [12]. Но при проведении испытаний через 1,5…2 месяца во всех случаях у гидрофобных цементов прочность существенно выше, так как контрольные теряют свою активность при хранении.

Таблица 6. Изменение характеристик цемента при гидрофобизации олеиновой кислотой в концентрации 0,1% (по М.И. Хигеровичу [12])

Table 6. Change in the characteristics of the cement after hidrophobization with oleic acid in concentration of 0.1% (in accordance with Higerovichu M.I. [12])

Вид клинкера[6]	Вид цемента	Нормальная густота, %	Предел прочности при сжатии, МПа, в возрасте		
			3 суток	7 суток	28 суток
БР	Контрольный	24,5	38,6	50,0	52,4
	Гидрофобный	30,0	38,1	49,5	55,4
НЦ	Контрольный	24,5	26,6	37,3	46,7
	Гидрофобный	29,0	23,8	36,3	50,5
Г-1	Контрольный	25,5	34,6	36,1	48,5
	Гидрофобный	30,0	38,8	34,1	43,4

Показательно, что наибольший рост прочности в работах А.А. Пащенко зафиксирован на ранних сроках твердения и при самой большой концентрации, что не совпадает с полученными в настоящей работе данными. Для примера сравним составы 5 и 6 (табл. 1). Расчет действующего вещества (ГКЖ-94) показывает, что в составах 5 и 6 его концентрация составляет 0,03 и 0,045% соответственно. Однако даже при таких малых концентрациях наблюдается устойчивое падение прочности на всех сроках твердения (табл. 3). Причем с увеличением количества гидрофобизатора прочность уменьшается.

Если проанализировать образцы 7 и 8 (табл. 1), то здесь количество действующего вещества (олеиновой кислоты) соответственно равно 0,04 и 0,06%, что примерно соответствует концентрации по М.И. Хигеровичу. Однако и здесь наблюдается существенная потеря прочности (табл. 3).

Для оценки влияния торфяной матрицы в композиционных гидрофобных модификаторах была проведена серия экспериментов с торфяными добавками ГМД-0 в концентрациях 0,1 и 0,3%, которые вносились при помоле клинкера ОАО «Лафарж Цемент» (г. Воскресенск). В исследованиях было установлено, что при малых концентрациях торфяной добавки (ГМД-0) качественные характеристики цемента не изменяются и полностью соответствуют действующим нормативным документам (табл. 7). Однако таких концентраций явно недостаточно для появления гидрофобного эффекта в минеральном вяжущем материале.

Таким образом, потеря прочности и изменение других качественных показателей цементов при использовании композиционных добавок вызывается, в основном, действием

Таблица 7. Исследование свойств портландцемента с торфяными гидрофобными добавками

Table 7. Study of the properties of Portland cement with peat-based hydrophobic additives

№	Показатель	Вид портландцемента		
		контрольный	с 0,1% добавкой ГМД-0	с 0,3% добавкой ГМД-0
1	Удельная поверхность, м^2 /кг	352	360	349
2	Нормальная густота цементного теста, %	24,5	26,0	26,0
3	Водоцементное отношение В/Ц	0,37	0,37	0,37
4	Начало схватывания, мин	145	195	195
5	Конец схватывания, мин	205	255	270
6	Предел прочности при изгибе (после пропаривания), МПа	5,0	5,3	5,1
7	Предел прочности при сжатии (после пропаривания[7]), МПа	33,9	35,2	34,7
8	Предел прочности при изгибе (3 суток), МПа	5,7	6,1	6,0
9	Предел прочности при сжатии (3 суток), МПа	36,8	35,9	35,2
10	Предел прочности при изгибе (28 суток), МПа	6,6	6,4	6,2
11	Предел прочности при сжатии (28 суток), МПа	47,7	45,5	44,8

6. В соответствии с принятыми в 50-е годы XX века обозначениями [12].
7. Пропаривание осуществлялось в течение 24 часов.

традиционных гидрофобизаторов. Различия же в результатах исследований 50–60-х гг. прошлого века и настоящих данных можно объяснить различиями в методиках подготовки цементных растворов для испытаний, которые в то время не приводили к дополнительному воздухововлечению в систему.

Для проверки этой гипотезы была проведена серия экспериментов с применением воздухоподавления при помощи добавок пеногасителей Agitan 230 и Defloam, а также с использованием ручного перемешивания раствора. Пеногасители вносились в раствор в концентрации 0,3% от массы вяжущего [9].

В результате проведения экспериментов было установлено, что даже применение ручного перемешивания раствора позволяет снизить дополнительную пористость раствора в 3,7…4,4 раза. Причем в добавках ГМД-0 этот эффект проявляется лучше, чем в композиционных модификаторах. Использование пеногасителей снижает негативное воздействие воздухововлечения в 5,5…11,3 раза, причем наибольшее действие они оказывают на традиционные гидрофобизаторы (в нашем случае на олеиновую кислоту).

Использование приемов подавления воздухововлечения при приготовлении цементных растворов ожидаемо позволило уменьшить приращение пористости и, соответственно, увеличить прочность. Например (табл. 8), в системах, включающих в себя ГМД-0, использование простого ручного перемешивания раствора привело к росту относительной прочности на сжатие в 28-суточном возрасте с 58,1% до 89,1%. В растворах с добавкой ГМД-20(ОК) эффект применения ручного перемешивания также достаточно высок: прочность увеличилась с 34% до 77%. В это же время, стандартные методы воздухоподавления показали большую эффективность. Они полностью снимают негативное воздействие гидрофобных модификаторов на прочность. В экспериментах наблюдается ее увеличение, по сравнению с контрольным образцом, с 95,5% до 104,5%, что является основанием для получения качественных гидрофобно-модифицированных цементов, соответствующих требованиям действующих нормативных документов.

Таблица 8. Зависимость прочности цементов от дополнительной пористости составов с применением средств подавления воздухововлечения

Table 8. Dependence of cement durability on additional porosity of composites with the use of means of air entrainment suppression.

Состав[8]	Дополнительная пористость ΔP, %	Прочность при изгибе и сжатии							
		2 суток				28 суток			
		$R_{изг}$		$R_{сж}$		$R_{изг}$		$R_{сж}$	
		МПа	%	МПа	%	МПа	%	МПа	%
1	0	5,8	100	21,9	100	9,9	100	51,3	100
3	7,1	0	0	0	0	7,2	72,7	29,8	58,1
3 Д	1,3	4,1	70,7	13,3	60,7	9,3	93,9	53,6	104,5
3 Р	1,6	2,9	50,0	8,3	37,9	8,1	81,8	45,7	89,1
8	13,6	3,4	58,6	6,9	31,5	5,9	59,6	17,6	34,3
8 А	2,0	4,7	81,0	16,3	74,4	9,3	93,9	49,0	95,5
8 Д	1,2	4,7	81,0	16,3	74,4	9,4	94,9	49,0	95,5
8 Р	3,7	–	–	–	–	8,1	81,8	39,5	77,0

Таким образом, в работе был проведен обобщенный анализ влияния композиционных гидрофобно-модифицирующих добавок на основе торфа на физико-механические свойства портландцемента во взаимосвязи с промышленно адаптированным способом его производства. Показаны основные направления, позволяющие улучшать качественные характеристики модификаторов, а также подходы к получению их композиционных составов, удовлетворяющих требованиям современных нормативных документов.

Библиографический список

1. *Misnikov, O.S.* Physicochemical principles of hydrophobization of mineral binders by additives produced from peat raw material // Theoretical Foundations of Chemical Technology. – 2006. – Vol. 40. – № 4. – P. 423–430.
2. *Misnikov, O.* A study of the properties of Portland cement modified using peat based hydrophobic admixtures // Polymer Science. Series D. – Vol. 7. – № 3. – 2014. – P. 252–259.

8. Значение индексов: «Д» – Delfoam; «А» – Agitan; «Р» – ручное перемешивание.

3. *Патент* 2500643 Российская Федерация МПК C04B28/14 Способ получения композиционного сыпучего гипсового материала / Мисников О.С.; заявитель и патентообладатель ООО «Промдобавка» и Мисников О.С. – № 2012116218/03(024452); заявл. 24.04.12; опубл. 10.12.13, Бюл. № 34.
4. *ГОСТ 31108-2003*. Цементы общестроительные: технические условия. – Введ. 2004-09-01. М.: ФГУП ЦПП, 2004. – 20 с.
5. *ГОСТ 10178-85.* Портландцемент и шлакопортландцемент: технические условия. – Введ. 1987-01-01. М.: Издательство стандартов, 2005. – 8 с.
6. *Хигерович, М.И., Байер, В.Е.* Гидрофобно-пластифицирующие добавки для цементов, растворов и бетонов. – М.: Стройиздат, 1979. – 125 с.
7. *Торфяной* воск и сопутствующие продукты / П.И. Белькевич, К.А. Гайдук, Т.Т. Зуев, Л.А. Иванова и др. – Мн.: Наука и техника, 1977. – 232 с.
8. *Суворов, В.И.* Научные основы формирования структуры торфа в технологиях получения продукции с заданными свойствами: дис. … докт. техн. наук. – Тверь, 2000. – 513 с.
9. *Несветаев, Г.В., Козлов, А.В., Филонов, В.А.* Влияние некоторых гидрофобизирующих добавок на изменение прочности цементного камня // Инженерный вестник Дона. – 2013. – Т. 25. – № 2 (25). – С. 134.
10. *ГОСТ 30744-2001.* Цементы. Методы испытаний с использованием полифракционного песка. – Введ. 2002-03-01. – М.: ГУП ЦПП, 2001. – 29 с.
11. *Алентьев, А.А., Клетченков, И.И., Пащенко, А.А.* Кремнийорганические гидрофобизаторы. – К.: Государственное издательство технической литературы, 1962. – 110 с.
12. *Хигерович, М.И.* Гидрофобный цемент и гидрофобно-пластифицирующие добавки. – М.: Государственное издательство по строительным материалам, 1957. – 207 с.

УДК 662.641.004.14:622.732:517.958

Королев И.О.

Королев Илья Олегович, аспирант кафедры геотехнологии и торфяного производства Тверского государственного технического университета (ТвГТУ). Тверь, ул. Академическая, 12

Пухова О.В.

Пухова Ольга Владимировна к. т. н., доцент кафедры геотехнологии и торфяного производства ТвГТУ. owpuhova@mail.ru

ПРИБОР И МЕТОДИКА УСКОРЕННОГО ОПРЕДЕЛЕНИЯ ДИСПЕРСНОСТИ ФОРМОВАННОГО ТОРФА

Аннотация. Рассмотрены основные характеристики, которыми оценивается дисперсность. Представлены исследования по изменению дисперсности и предельного напряжения сдвига переработанного торфяного сырья в процессе механической переработки при производстве формованной торфяной продукции. Дано объяснение процессов, происходящих в процессе механической переработки торфяного сырья. Получены уравнения, связывающие предельное напряжение сдвига с влагосодержанием и степенью переработки, которые позволяют ускоренно в процессе переработки торфяного сырья управлять физико-механическими свойствами готовой продукции за счет оперативной переналадки перерабатывающего оборудования.

Ключевые слова: влагосодержание, торф, механическая переработка, дисперсность, условная удельная поверхность, предельное напряжение сдвига.

Korolev I.O.

Korolyov Ilya O., graduate student of Geotechnology and Peat Production Tver State Technical University. Tver, Academicheskaya, 12

Puchova O.V.

Pukhova Olga V., PhD, Associate Professor, Department of Geotechnology and Peat Production TvGTU

THE DEVICE AND METOD OF THE ACCELERATED DETERMINATION OF DISPERSION OF THE FORMED PEAT

Abstract. The main characteristics by which dispersion is estimated are considered. Researches on change of dispersion and limit tension of shift raw materials of the recycled peat in the course of mechanical processing by production of the formed peat are presented. The explanation of the processes happening in the course of mechanical processing of peat raw materials is offered. The equations connecting the limit tension of shift with moisture content and extent of processing which allow are received is accelerated in the course of processing of peat raw materials to operate physicomechanical properties of finished goods due to expeditious readjustment of the overworking equipment.

Key words: moisture content, peat, mechanical processing, dispersion, conditional specific surface, limit tension of shift.

Механически переработанная торфяная масса является сложной полидисперсной системой, включающей в себя дисперсионную среду (воду) и дисперсную фазу, состоящую из частиц различных размеров. В работах С.Г. Солопова [1] было установлено, что размер частиц торфа определяет технологические свойства и дает возможность оценить эффективность его переработки различными механизмами. Таким образом, при изменении степени измельчения торфа появляется возможность управления процессами структурообразования при формовании и сушке [2], которые оказывают непосредственное влияние на конечные свойства готовой продукции.

Основной характеристикой дисперсных торфяных систем является их дисперсность – степень измельченности материала, выраженная в процентах, которую часто связывают с условной удельной поверхностью частиц. Площадь поверхности, отнесенная к единице массы сухого вещества, характеризует собой глубину процесса диспергирования. Определение степени дисперсности и оценка ее влияния на физико-химические и механические свойства торфа необходимы для обоснования его использования в качестве исходного сырья для различных технологических процессов. Основными характеристиками дисперсности торфа служат:

- содержание фракций определенных размеров P_i, %;
- полная удельная поверхность частиц, S_y, м^2/кг;
- средневзвешенный диаметр частиц грубодисперсной фракции (>1 мкм) $d_{>1} = \sum d_i P_i / \sum P_i$, где d_i – средний диаметр частиц, содержание которой равно P_i;
- средневзвешенный диаметр частиц высокодисперсной фракции (<1 мкм) $d_{<1} = \sum d_i P_i / \sum P_i$;
- процентное содержание частиц менее 1 мкм;
- кривые распределения частиц по размерам;
- условная удельная поверхность S, м^2/кг.

Для вычисления условной удельной поверхности С.Г. Солоповым была установлена эмпирическая зависимость:

$$S = \Delta m_c (1 + k) \times 10^4,$$

где Δm_c – содержание фракций размером менее 4 мкм; k – коэффициент, зависящий от Δm_c: k = 0,2, при Δm_c = 0,2…0,3; k = 0,15, при Δm_c = 0,3…0,5; k = 0,1, при Δmc > 0,5.

В экспериментах степень переработки торфа оценивали по показателю условной удельной поверхности. Она вычислялась по результатам сокращенного ситового анализа. Подготовка проб к сокращенному ситовому анализу состояла в суточном замачивании навески торфа массой 15 г в стеклянном стакане с дистиллированной водой. Сухое вещество пробы определялось по параллельно взятой навеске такой же массы. Перед началом опыта содержимое стакана переносили в литровую колбу, заливали до половины объема водопроводной водой. Затем колбу закрывали резиновой пробкой и встряхивали в течение 10 мин до получения однородной суспензии на механическом встряхивающем устройстве. После встряхивания суспензию сливали из колбы через сито с ячейками 0,25 × 0,25 мм. Остаток на сите промывали вертикальными колебательными движениями в течение 6–10 мин в кристаллизаторе с водопроводной водой, заменяя ее с периодичностью 1 мин. Отсутствие коллоидной фракции в воде являлось признаком хорошей отмывки фракций размером меньше 250 мкм. Перед тем как остаток на сите перенести в чашку Петри, его промывали в кристаллизаторе с дистиллированной водой. Выпаривание и сушку содержимого чашки Петри велось в сушильном шкафу при температуре 145–150 °С. Показатель содержания фракций размером менее 250 мкм $P_{<250}$ (%) рассчитывался по формуле:

$$P_{<250} = 100\ (-m_0)\ /\ m_c$$

где m_c – масса сухого вещества, г; m_0 – остаток на сите, г. По показателю $P_{<250}$ вычисляется условная удельная поверхность:

для верхового и переходного переработанного торфа

$$\lg S = 2{,}19 \lg P_{<250} - 0{,}53,$$

для низинного переработанного торфа

$$\lg S = 3{,}6 \lg P_{<250} - 3{,}39.$$

Для оценки структурно-механических свойств переработки торфа используется величина предельного напряжения сдвига θ. Она достаточно чувствительна к изменению состава и структуры дисперсных материалов. Величина предельного напряжения сдвига отображает особенности структуры торфа, физико-механических свойств торфяных систем в широком диапазоне влагосодержаний. Метод статической микропенетрации с применением пенетрометра позволяет быстро определять локальные значения предельного

напряжения сдвига в вязкопластичном и в твердообразном состояниях.

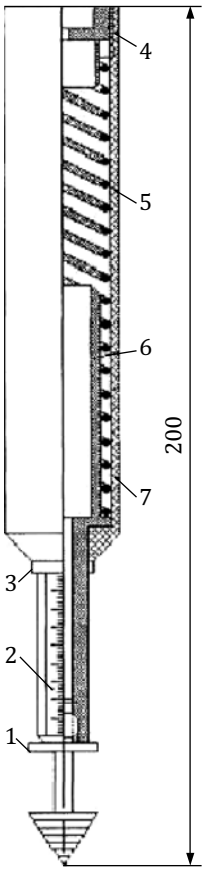


Рис. 1. Схема пенетрометра: 1 – конический наконечник; 2 – измерительная линейка длиной 40 мм; 3 – кольцевой индикатор; 4 – пробка; 5 – пружина; 6 – шток; 7 – металлический цилиндр

Fig. 1. Scheme of a penetrometr: 1 – conic tip; 2 – measuring ruler 40 mm; 3 – ring indicator; 4 – stopper; 5 – spring; 6 – rod; 7 – metal cylinder

В качестве упругого элемента прибора использован набор пружин с жесткостью 0,1–3,0 Н/м. Плавным нажатием на цилиндр наконечник погружают в исследуемый материал на всю рабочую длину (10 мм). При этом происходит перемещение цилиндра и индикаторного кольца относительно штока. После снятия нагрузки и извлечения наконечника из материала фиксируют перемещение кольца относительно измерительной линейки. Усилие сопротивления проникновению наконечника в материал, оказываемое структурой торфа, в соответствии с законом Гука, равно произведению жесткости пружины на величину ее сжатия.

В пенетрометре устанавливали пружину с жесткостью 0,1 кН/м и наконечник в виде конуса с константой 0,214. Конус внедряли в куски торфа на всю высоту. Величину предельного напряжения сдвига в МПа рассчитывали по формуле:

$$\theta = 0{,}1\ l_и,$$

где $l_и$ – показания индикатора, мм.

Переработку торфяного сырья осуществляли лабораторным шнековым механизмом. Изменение дисперсности достигали за счет многократного пропускания торфяного сырья через перерабатывающее устройство, а также применением различных режущих элементов и приспособлений.

В процессе механического диспергирования происходит уменьшение содержания в торфе волокнистых и грубодисперсных фракций и увеличивается количество тонкодисперсных. С уменьшением размера частиц растет их концентрация в единице объема, что приводит к росту числа связей между частицами через молекулы воды. Торфяная система переходит из вязкопластичного в упругопластичное состояние с образованием новых связей.

Экспериментально установлено, что при механической переработке торфа на одном и том же механизме с различными значениями влагосодержания дисперсность получаемой массы различна (рис. 2) из-за проявления сил различной природы [3] и, соответственно, условий разрушения структуры.

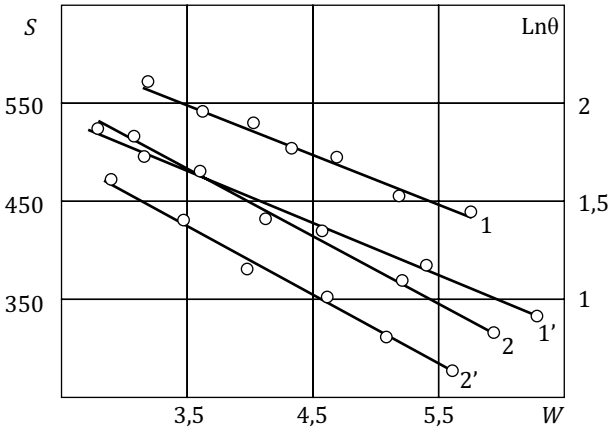


Рис. 2. Зависимость условной удельной поверхности *S* (1, 2) (м^2 /кг) и предельного напряжения сдвига θ (1', 2') (кПа) от влагосодержания торфа: верховой магелланикум R = 20 (1, 1')%; низинный осоковый R = 30 (2, 2')%

Fig. 2. Dependence of a conditional specific surface of *S* (1, 2) (m^2 /kg) and the limit tension of shift of θ (1', 2') (kPa) from moisture content of peat: riding magellanikum R = 20 (1, 1')%; low-lying sedge R = 30 (2, 2')%

Зависимость предельного напряжения сдвига от степени дисперсности и влагосодержания, на основе обработки данных (рис. 2, 3), может быть выражена через экспоненциальную функцию:

$$\theta = \theta_{0W} \exp[-C_S (S_0 - S)],$$

где θ_{0W}, C_S –константы структурообразования.

При более низких значениях влагосодержания происходит лучшее измельчение частиц. При увеличении влагосодержания торфяной массы предельное напряжение сдвига уменьшается (рис. 2).

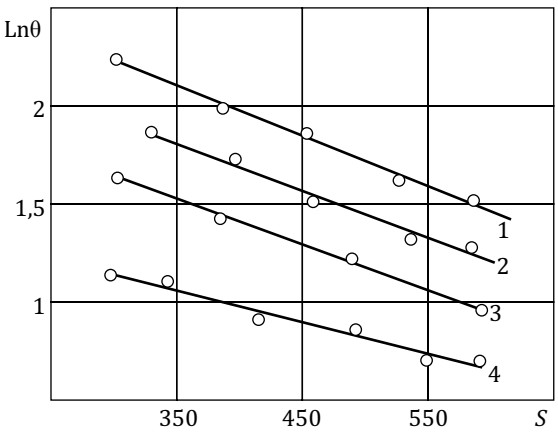


Рис. 3. Изменение предельного напряжения сдвига θ (кПа) от удельной поверхности *S* (м²/кг) верхового магелланикум торфа *R* = 20% при различных значениях влагосодержания формования *W* = 3,5 (1), 3,9 (2), 4,6 (3) и 5,7 (4) кг/кг

Fig. 3. Change of limit tension of shift of θ (kPa) from a specific surface of S (m²/kg) riding magellanikum peat R = 20%, at various values of moisture content of formation of W = 3.5 (1), 3.9 (2), 4.6 (3) and 5.7 (4) kg/kg

Это происходит из-за малого сопротивления при движении торфа в перерабатывающем устройстве. Однократная переработка торфа шнеком без противодавления незначительно изменяет значения предельного напряжения сдвига (рис. 3), из-за разрушения его макроструктуры. Увеличение механической переработки (S_0 = 490–550 м²/кг) приводит к значительному снижению предельного напряжения сдвига, что вызвано разрушением растительных остатков и высвобождением внутриклеточной и иммобилизованной воды. Система становится подвижной и пластичной, что приводит к уменьшению числа дефектов структуры и росту прочности формованной продукции.

Анализ результатов исследований показал, что предельное напряжение сдвига зависит от степени переработки, влагосодержания и температуры. Если принять, что в полевых условиях температура меняется незначительно, то в результате обработки экспериментальных данных методом математической статистики можно получить уравнения, связывающие предельное напряжение сдвига θ (кПа) с влагосодержанием W (кг/кг) и степенью переработки S_0 (м²/кг). Уравнения с коэффициентом корреляции 0,97 принимают вид:
для верхового торфа

$$S_0 = 100\ (9 - 2 \ln\theta - 0{,}1\ W) \pm 5,\ (1),$$

для низинного торфа

$$S_0 = 100\ (15 - 1{,}5 \ln\theta - 2\ W) \pm 5,\ (2)$$

при изменении влагосодержания в пределах от 3,5 до 5,7 кг/кг; предельного напряжения сдвига – от 2,04 до 10,7 кПа.

На основе уравнений разработан метод ускоренного определения дисперсности в процессе формовании торфяного сырья для получения различной продукции.

Определение дисперсности формованных образцов из торфяного сырья производится по следующей методике.

С помощью пенетрометра определяется предельное напряжение сдвига. Для этого плавным нажатием на цилиндр наконечник погружается в исследуемый материал на всю рабочую длину. При этом происходит перемещение цилиндра и индикаторного кольца относительно штока. После снятия нагрузки и извлечения наконечника из материала фиксируют перемещение кольца относительно измерительной линейки.

Для пружины с жесткостью 0,1 Н/м (конический наконечник в виде конуса с константой 0,214) предельное напряжение сдвига рассчитывается по формуле $\theta = 0{,}1 \times l_и$, где $l_и$ – показания индикатора в мм.

Для пружины с жесткостью 0,2 Н/м (конический наконечник в виде конуса с константой 0,214) предельное напряжение сдвига определяется зависимостью: $\theta = 0{,}36 \times l_и$.

2. Следующими этапами является определение влагосодержания формованного образца и расчет его дисперсности по формулам (1) и (2).

Таким образом, способ ускоренного определения дисперсности позволяет оперативно контролировать степень переработки при производстве формованной продукции из торфа.

В конечном итоге это дает возможность управлять физико-механическими свойствами готовой продукции за счет быстрой переналадки или замены типа перерабатывающего оборудования.

Библиографический список

1. *Солопов, С.Г.* Основания комплексной механизации добычи торфа на топливо экскаваторным способом с пониженной эксплуатационной влажностью: Автореф. дис. … д. т. н. – М., 1955. – 40 с.
2. *Afanas'ev, A.E., Gamayunov, S.N., Misnikov, O.S.* Structurization processes drying of sapropels with varying ash content // Colloid Journal. – 1999. – Т. 61. – № 3. – P. 274–279.
3. *Технический* анализ торфа / Е.Т. Базин, В.Д. Копенкин, В.И. Косов и др. – М.: Недра, 1992. – 431 с.
4. *Пухова О.В.* Закономерности изменения физических свойств торфа при его переработке и сушке: Автореф. дис. … канд. техн. наук: 05.15.05 / О.В. Пухова; Тверской государственный технический университет. – Тверь, 1998. – 20 с.

УДК 662.641.047

Вележева С.И.

Вележева Светлана Ивановна, к. т. н., доцент каф. технической механики Тверского государственного технического университета (ТвГТУ) Тверь, ул. Маршала Конева, 12. velezhsi@mail.ru

Цветков И.В.

Цветков Иван Викторович аспирант кафедры геотехнологии и торфяного производства ТвГТУ. Тверь, Академическая, 12. dekadent@list.ru

Velezheva S.I.

Velezheva Svetlana I., Ph.D., Associate Professor Dep. Technical mechanics of the Tver State Technical University. Tver, street Marshal Konev, 12

Tsvetkov I.V.

Tsvetkov Ivan V., Graduate Student Geotechnology and Peat Production. Tver, Academicheskaya, 12

ИЗМЕНЕНИЕ ЗОЛЬНОСТИ СЫРЬЯ ДЛЯ БРИКЕТИРОВАНИЯ В ПРОЦЕССЕ СУШКИ

Аннотация. В статье рассмотрены вопросы изменения зольности торфа при сушке дымовыми газами. Рассмотрен технологический процесс и набор оборудования сушильного участка торфоперерабатывающего предприятия. Определено влияние конструктивных особенностей оборудования сушильного участка на снижение уровня зольности в готовом продукте. Рассмотрены основные конструкции золоуловителей, применяемых в технологическом процессе искусственной сушки в барабанных сушилках. Определены три составляющие зольности готового продукта: зольность сырья; зола, уносимая из топочного устройства; увеличение зольности за счет выхода летучих. Предложено замещение высокозольного торфяного топлива для топочных устройств, при производстве торфяных брикетов, на древесное, полученное параллельно с добычей торфа.

Ключевые слова: торф, сушка, зола, брикетирование, барабанная сушилка, дымовые газы, золоуловитель.

THE EFFECT OF DRYING PROCESSES OF RAW MATERIALS FOR BRIQUETTING ON ASH

Abstract. Problems of change of ashing of peat by means of drying by flue gas are considered in this article. A technological process and equipment of drying section of peat processing enterprise. Influence of constructive peculiarities of technique equipment of drying section at reducing of ashing in ready product is determined. The basic design of ash collectors used in the technological process of artificial drying in rotary dryers is considered. Three components of the ashing of ready product are identified they are the ashing of the raw material; the ash is carried away from the combustion device; the increase of ashing due to volatile. The replacement of high ash peat fuel for the combustion device in the production of peat briquettes in wood obtained in parallel with the extraction of pear is proposed.

Key words: peat, drying, ash, briquetting, rotary drum dryer, flue gases, ash collector.

Использование местного топлива вследствие удорожания нефти и газа становится все более выгодным. Рациональное использование местных энергетических ресурсов позволяет находить новые экологически чистые методы получения энергии. Для многих регионов России использование торфа в качестве основного источника топлива является оправданным и перспективным [1]. Россия обладает 37,5% мировых запасов торфа, что может послужить фактором для использования торфяного топлива не только на местном рынке, но и для экономически обоснованного экспорта, как между регионами Российской Федерации, так и в другие страны.

Торфяные брикеты являются одним из перспективных видов местного топлива, пользующимся большим спросом у населения из-за удобства применения и доставки [2]. Производство торфяных брикетов включает в себя ряд последовательных процессов: искусственную сушку, дробление и прессование. Процессом, непосредственно влияющим на увеличение теплотворной способности торфа, является сушка. Около 88% всей влаги, содержащейся в торфе, приходится на воду механического удерживания [3], энергия связи которой невелика, и составляет около 0,2 ккал/моль. Поэтому для удаления влаги из торфяного сырья ряд производителей торфяных брикетов и гранул используют пневмобарабанные сушилки типа АВМ. На рис. 1 представлена технологическая схема сушильного комплекса на базе сушильного барабана АВМ-0,65.

В сушильном комплексе на базе барабана АВМ-0,65 сушильным агентом являются дымовые газы, выработанные при сгорании топлива в теплогенераторе. Одновременно с газами в барабан по наклонному скребковому транспортеру поступает влажное сырье. Выгрузка из сушильного барабана производится пневмотранспортом за счет разряжения, создаваемого дымососом. Высушенное сырье осаждается в циклонном сепараторе, после чего поступает на участок дробления. Этот сушильный комплекс за счет отсутствия громоздкого теплообменника и дополнительного тягодутьевого устройства позволяет сэкономить на оборудовании и электроэнергии.

Технологическая схема по производству брикетов используется для получения готового продукта влажностью до 8–10% при начальной влажности 50–55%. Но при этом вместе с сушильным агентом в барабан попадает вылетевшая из теплогенератора летучая зола и несгоревшее топливо. Общее количес-

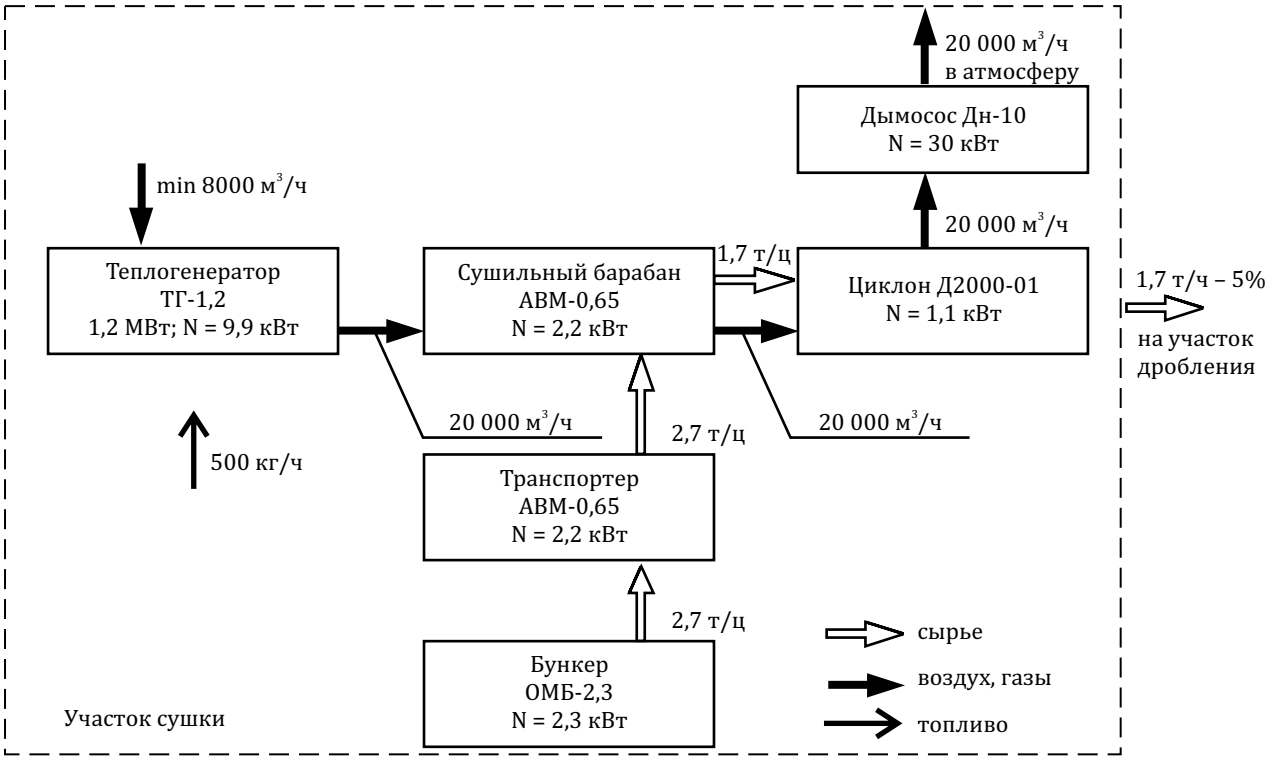


Рис.1. Технологическая схема сушильного комплекса на базе барабана АВМ-0,65

Fig.1. Technological scheme of the drying complex at the base of the drum-AVM 0.65

тво твердых выбросов, попавших в барабан, можно определить по формуле [4]:

$$M_{тв} = 0{,}01B\left(a_{ун}A^r + q_4\frac{Q_i^r}{32{,}68}\right)(1-\eta_з),$$

где B – расход топлива, кг/ч; A^r – зольность топлива на рабочую массу, %; $a_{ун}$ – доля золы топлива в уносе; q_4 – потери тепла от механической неполноты сгорания топлива, %; $\eta_з$ – доля твердых частиц, улавливаемых в золоуловителе; 32,68 – теплота сгорания углерода, МДж/кг.

Доля золы в уносе $a_{ун}$ обусловлена конструктивными особенностями топочного устройства. Так, для шахтных, шахтно-цепных топок и теплогенераторов скоростного горения этот показатель составляет 0,10 [5], а для слоевых топок бытовых теплогенераторов – около 0,25.

Зольность готового продукта определяется тремя составляющими:

$$A_{с.в.}^{г.п.} = A_{с.в.}^{н} + \Delta_1 + \Delta_2,$$

где $A_{с.в.}^{г.п.}$ – зольность по сухому веществу сырья, подаваемого в сушильный барабан; Δ_1 – увеличение зольности за счет приносимой золы из теплогенератора; Δ_2– увеличение зольности за счет выхода летучих в процессе сушки.

На рис. 2 схематично представлено изменение зольности в процессе сушки.

Процесс сушки торфяного сырья в сушильных барабанах происходит при температуре выше температуры начала выхода летучих ($T_н$ = 370 К) [6], за счет чего концентрация золы в готовом продукте незначительно увеличивается [7]. Опытные данные по количеству выхода органического вещества при сушке в барабанных сушилках отсутствуют. Увеличение зольности за счет приносимой золы из теплогенератора зависит как от конструктивного исполнения теплогенератора и золоулавливающего устройства перед барабаном, так и от зольности используемого топлива. Массу золы, улетевшей в сушилку, можно определить по формуле [4]:

$$M_З = 0{,}01B \cdot a_{ун}A^r\,(1 - \eta_З).$$

Увеличение количества золы сказывается на качестве готовой продукции и может привести к получению продукции более низкого сорта или брака. Повышенная зольность оказывает негативное воздействие на рабочие поверхности прессов и грануляторов, что приводит к более быстрому истиранию матриц и фильер, и выходу из строя техники.

Решением данной проблемы может служить замена высокозольного торфяного топлива для теплогенераторов на древесное, полученное параллельно с добычей торфа. Система утилизации древесных остатков на торфодобывающих предприятиях практически отсутствует, что делает древесину, извлеченную из торфяной залежи при подготовке производственных площадей к эксплуатации, дешевым и доступным топливом [8]. Данное решение удобно применять на производствах, расположенных на торфодобывающих предприятиях или в непосредственной близости с ними. Зависимость унесенной золы от зольности топлива представлена на рис. 3. Использование древесного топлива в производстве торфяной продукции осложняется необходимостью использования дополнительного оборудования для измельчения и складирования древесины.

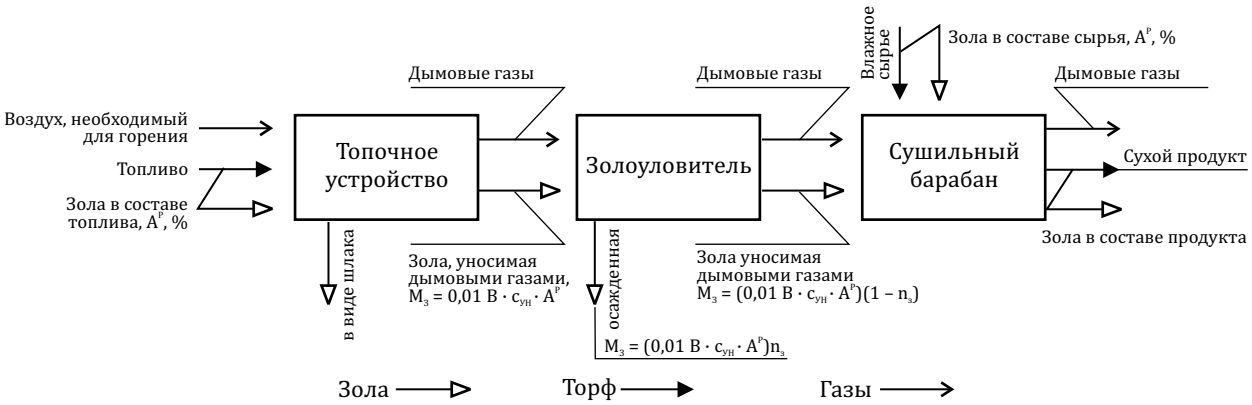


Рис. 2. Схема движения золы, торфа, дымовых газов на участке сушки

Fig. 2. Scheme of ash, peat, flue gas drying section

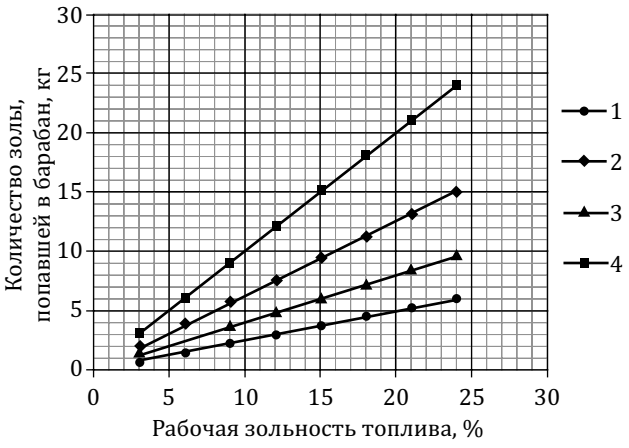


Рис. 3. Зависимость количества золы, попавшей в барабан, от зольности топлив:
1 – для сушильного барабана АВМ-0,65, $a_{ун}$ = 0,10;
2 – для сушильного барабана АВМ-0,65, $a_{ун}$ = 0,25;
3 – для сушильного барабана АВМ-1,5, $a_{ун}$ = 0,10;
4 – для сушильного барабана АВМ-1,5, $a_{ун}$ = 0,25

Fig. 3. The dependence of the amount of the ash trapped in the drum of fuel ash: 1 – for the drying drum AVM-0.65 Aung = 0.10; 2 – for the drying drum AVM-0.65 Aung = 0.25; 3 – for drying drum – AVM-1.5 Aung = 0.10; 4 – for the drying drum AVM-1.5, Aung = 0.25

Не менее важным является необходимость производить процесс сушки только при устоявшемся режиме горения в теплогенераторе. При выводе его на режим тяга дымовых газов не должна осуществляться через барабанную сушилку, а должна идти через аварийно-растопочную трубу (рис. 4). При этом более эффективным и менее взрыво- и пожароопасным является механизированная подача топлива в топку, при которой регулирование слоя топлива происходит автоматически.

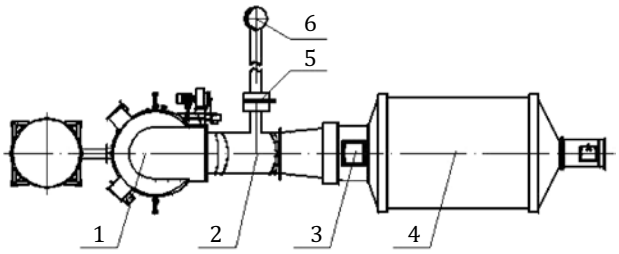


Рис. 4. Сушильный барабан АВМ-0,65 в сборе с теплогенератором ТГ-1,2: 1 – теплогенератор; 2 – газоход соединительный; 3 – предтопок-искрогаситель; 4 – сушильный барабан; 5 – шибер; 6 – аварийно-растопочная труба

Fig. 4. Stove AVM 0.65 assembled with heat generator TG-1.2: 1 – heat generator; 2 – flue connection; 3 – primary furnace, spark arrestor; 4 – drum dryer; 5 – gate; 6 – emergency lighting-tube

Для очистки дымовых газов перед сушильными барабанами устанавливают предтопки-искрогасители (рис. 5), которые, закручивая поток газов, создают аэродинамическое сопротивление, не позволяющее проникнуть в сушильный агрегат тяжелым твердым частицам, а завихритель, установленный на входе

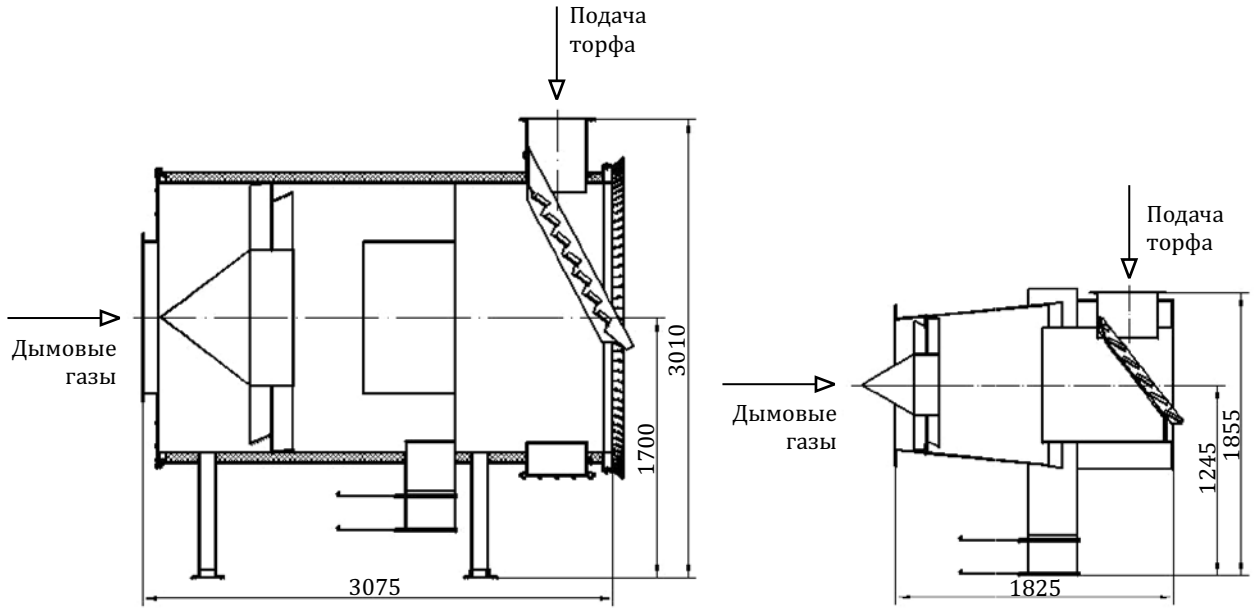


Рис. 5. Предтопки-искрогасители: А – для барабана АВМ-1,5; Б – для барабана АВМ-0,65

Fig. 5. Pre-furnace-spark arrestors: A – Drum AVM-1.5 B – Drum AVM-0.65

в аппарат, препятствует попаданию в барабан горящих частиц. Таким образом, предтопки работают в качестве золоуловителей. КПД золоулавливания данных аппаратов невысок, около 50–70 %, но этого достаточно для производства качественной продукции.

Проведенные исследования по влиянию конструктивных особенностей оборудования в процессе сушки торфяного сырья позволили определить три составляющие зольности готового продукта: зольность сырья; зола, уносимая из топочного устройства; увеличение зольности за счет выхода летучих, что в итоге при использовании золоуловителей в технологическом процессе искусственной сушки в барабанных сушилках снизит уровень зольности в готовом продукте.

Таким образом, технология сушки сырья для брикетирования дымовыми газами для производства торфяных брикетов является эффективным и удобным способом получения готового продукта с повышенным качеством. Для этого в технологическом процессе необходимо высокозольное торфяное топливо для топочных устройств заменить древесиной, извлекаемой из торфяной залежи при подготовке производственных площадей к добыче торфяного сырья и являющейся отходом. Это позволит рационально использовать ресурсы торфяного месторождения.

Библиографический список

1. *Гамаюнов, С.Н., Мисников, О.С., Пухова, О.В.* Перспективные направления использования продукции на основе гранулированного торфа // Горный журнал, 1999. – № 10. – С. 41–44.
2. *Яблонев, А.Л., Пухова, О.В.* Особенности транспорта торфа к конечному потребителю в г. Твери // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2010. – Т. 1. – С. 34–35.
3. *Базин, Е.Т., Лиштван, И.И., Попов, М.В.* Курс физики торфа. Часть II. – Калинин: КГУ, 1978. – 102 с.
4. *Методика* определения выбросов загрязняющих веществ в атмосферу при сжигании топлива в котлах производительностью менее 30 тонн пара в час или менее 20 Гкал в час. – Государственный комитет Российской Федерации по охране окружающей среды, 1999.
5. *О проведении* расчетов выбросов вредных веществ в атмосферу по «Методике определения выбросов загрязняющих веществ в атмосферу при сжигании топлива в котлах производительностью менее 30 тонн пара в час или менее 20 Гкал в час». – Методическое письмо НИИ «Атмосфера» от 17.05.2000 г. № 335/33-07.
6. *Соколов, Б.А.* Котельные установки, работающие на твердом топливе: учеб.пособие. – М.: Академия, 2012. – 64 с.
7. *Любов, В.К., Горюнов, В.В.* Результаты исследования эффективности работы цеха по производству древесных гранул // ИВУЗ. Лесной журнал. – 2009. – № 5. – С. 135–145.
8. *Мисников, О.С.* Разработка научных принципов утилизации промышленных отходов с комплексным использованием ресурсов торфяных месторождений: Автореф. дис. ... д. т. н. – Тула: ТулГУ, 2007. – 40 с.

УДК 622.331:622.271.9.001.2

Густова Х.О.

Густова Христина Олеговна, магистрант кафедры геотехнологии и торфяного производства Тверского государственного технического университета (ТвГТУ). Тверь, Академическая, 12. tinka@list.ru

Купорова А.В.

Купорова Александра Владимировна, старший преподаватель кафедры ГТП ТвГТУ. borale@inbox.ru

ОПРЕДЕЛЕНИЕ РЕЗЕРВА ПРИ НЕВЫПОЛНЕНИИ ПЛАНОВЫХ ПОКАЗАТЕЛЕЙ ДОБЫЧИ ТОРФА

Аннотация. В статье приведена методика расчета проектного количества двухдневных технологических циклов с учетом необходимого резерва для стабильной поставки потребителю фрезерного торфа. Рассматриваются достоинства и недостатки методик определения проектного количества циклов и переходящих запасов фрезерного торфа. Определена последовательность выбора вероятности выполнения количества циклов в зависимости от необходимого резерва торфяной продукции. Дано обоснование проектного количества двухдневных циклов в зависимости от величины резерва фрезерного торфа. Приведены примеры расчетов.

Ключевые слова: торф, производство, технология, цикл, вероятность, добыча, резерв.

Gustova Ch.O.

Gustov Christina O., graduate student of the Department of Geotechnology and Peat Production Tver State Technical University. Tver, Academicheskaya, 12. tinka@list.ru

Kuporova A.V.

Kuporova Alexandra V., senior lecturer in GTR TvGTU. borale@inbox.ru

DEFINITION OF THE RESERVE AT NON-PERFORMANCE OF PLANNED INDICATORS OF PRODUCTION OF PEAT

Abstract. The article describes the method of calculating the amount of the two-day project work cycles with regard to the required reserve for a steady milled peat supply to a consumer and considers the advantages and disadvantages of methods for determining the number of design cycles and the carryover of milled peat. The sequence of selection probabilities perform the number of cycles, depending on the required reserve of peat production. The substantiation of the project the number of two-day cycles, depending on the amount of provision of milled peat. Examples of calculations are given.

Key words: peat, production, geotechnology, cycle, likelihood, extraction, reserve.

В условиях рыночной экономики поставка торфяной продукции потребителю в зафиксированные договорами сроки приобретает исключительно важное значение. В связи с этим возникла необходимость уточнения методов расчета проектных производственно-технологических показателей добычи фрезерного торфа. На кафедре геотехнологии и торфяного производства (ГТП) Тверского государственного технического университета разработана методика по определению проектного количества циклов с учетом метеорологических условий региона расположения торфяного производства и принципа организации работы торфяных машин. Расчеты выполняются на основе фактических суточных метеорологических показателей, определенных за последние 30 лет: количества осадков; психрометрической разности в 15.00; скорости ветра в дневное время; среднесуточной температуре воздуха.

В основу расчета возможного количества циклов в каждом году принята методика ВНИИТП [1]. В соответствии с этими рекомендациями для обоснования проектного количества циклов необходимо обработать метеорологические показатели не менее чем за последние 30 лет. За каждый сезон определяется их возможное количество как сумма коэффициентов цикличности за уборочные дни и сезонная испаряемость с поверхности почвенного испарителя методом суммирования суточных значений. Проектное количество циклов зависит от двух показателей– вероятности их выполнения и размера максимального резерва фрезерного торфа, необходимого для поставки потребителю в неблагоприятные по метеорологическим условиям сезоны.

Методика ВНИИТП по определению переходящих запасов фрезерного торфа, включая в себя выбор модульных коэффициентов с учетом недопоставки готовой продукции в неблагоприятные сезоны, является довольно сложной в расчетах и недостаточно понятной для производственного персонала [2]. Более простой и наглядной является методика Московского торфяного института [3], основанная на расчете движения резерва в течение тридцатилетнего ряда, который необходим для обеспечения поставки фрезерного торфа в расчетных объемах в неблагоприятные по метеорологическим условиям сезоны.

В производственных условиях установлено, что из-за потерь готовой продукции в процессе хранения максимальный размер резерва не должен превышать 40%. С учетом экономических показателей размер резервной продукции должен быть не ниже 25%.

Технологический процесс производства фрезерного торфа может быть организован по одному из двух вариантов в зависимости от категории дней сушки:

- первый вариант предполагает постоянную продолжительность цикла, то есть время от фрезерования до уборки включительно,
- второй вариант организации технологического процесса основан на примерно одинаковой глубине фрезерования, которая соответствует средним погодным условиям для сушки торфа. Таким образом, в дни с хорошей категорией сушки торф высыхает раньше планового срока, и часть его остается неубранным, поскольку количество уборочных машин рассчитывается на плановую продолжительность цикла. В дни же со слабой категорией сушки продолжительность цикла возрастает, и торфяные машины простаивают из-за отсутствия объема работ.

Для устранения этих недостатков разработаны методы расчета коэффициентов, учитывающих снижение проектного количества циклов из-за организации работы бункерных уборочных машин [3]. Выполненные расчеты показывают, что в результате учета организационных факторов при их работе сезонные сборы снижаются на 10–15% по сравнению со значениями, которые рассчитываются проектными организациями.

Определение поправочного коэффициента к проектному количеству циклов при организации процесса с постоянными цикловыми сборами при уборке торфа бункерными машинами основано на предположении равенства необходимой для сушки торфа испаряемости за цикл, с одной стороны, и произведения фактической средней испаряемости за сутки на расчетную продолжительность цикла, с другой стороны.

Он находится в пределах от 0,85 до 0,90 (в зависимости от метеорологических условий региона расположения торфяного производства) [4].

Для определения резерва определяется возможное (расчетное) количество циклов как сумма коэффициентов цикличности за уборочные дни и сезонная эффективная испаряемость с поверхности почвенного испарителя методом суммирования суточных значений. Итоговые показатели расчетов для группы торфяной продукции Г-2 (энергетическое и коммунально-бытовое топливо) приведены в табл. 1.

Параметры статистических рядов по количеству циклов и эффективной испаряемости за сезон определяются по данным таблицы 1.

Статистические показатели рассматриваемых в примере рядов приведены в табл. 2.

Согласно данным табл. 1 и 2, проектное количество циклов зависит от двух показателей – вероятности выполнения количества циклов и размера максимального резерва фрезерного торфа, необходимого для поставки потребителю в неблагоприятные по метеорологическим условиям сезоны (вероятность выполнения – это наличие в сезоне таких погодных условий, которые обеспечивают выполнение и перевыполнение проектных показателей, т. е. количества циклов и эффективной испаряемости за сезон).

При определении резерва заложен принцип создания и движения резерва фрезерного торфа с учетом заданной вероятности выполнения плана добычи фрезерного торфа.

Расчеты вероятности выполнения плана добычи фрезерного торфа сведены в табл. 3 и 4.

По данным табл. 3 и 4 строится график (рисунок) зависимости проектного количества циклов и эффективной испаряемости за сезон в зависимости от вероятности выполнения этих показателей.

Рисунок. Зависимость количества циклов (1) и эффективной испаряемости за сезон (2) от вероятности выполнения

Figure. The dependence of the number of cycles (1) and the evaporation of the season (2) the probability of execution

Таблица 1. Сводные результаты расчетов количества циклов и эффективной испаряемости

Table 1. Summary of results of calculations of the number of cycles and the effective evaporation

Годы работы	Расчетное количество циклов $n_{цi}$	Эффективная испаряемость за сезон $I_{эi}$, кг/м^2	Испаряемость за цикл $i_{э.ц}$, кг/м^2
1	31,00	240,4	7,75
2	19,75	157,1	7,95
3	22,25	192,2	8,64
... ...	... ...	... ...	... ...
30	28,50	287,8	10,10
В среднем за 30 лет	25,50	210,8	8,27

Таблица 2. Статистические параметры рядов по количеству циклов и эффективной испаряемости

Table 2. Statistical parameters of the series of cycles and the number of effective evaporation

Параметры рядов	Ряд количества циклов	Ряд испаряемости за сезон, кг/м^2
Среднее значение	25,50	210,8
Среднее квадратическое отклонение	5,60	62,3
Коэффициент вариации (%)	22,0	29,5
Средняя ошибка среднего значения	1,02	11,37
Показатель точности (%)	4,0	5,4

Таблица 3. Вероятность выполнения количества технологических циклов

Table 3. The probability of the number of process cycles

Интервалы по количеству циклов	Среднее значение интервала $\bar{x}_i$	Частота η_i	Сумма частот $\Sigma\eta_i$	Вероятность выполнения числа циклов p, %
37,00–33,00	35	3	3	10,0
32,99–29,00	31	4	7	23,3
28,99–25,00	27	7	14	46,7
24,99–21,00	23	8	22	73,3
20,99–17,00	19	4	26	86,7
16,99–13,00	15	3	29	96,7
12,99–9,00	11	1	30	100

Таблица 4. Вероятность выполнения эффективной испаряемости за сезон

Table 4. The probability of effective evaporation of the season

Интервалы по испаряемости за сезон, кг/м^2	Среднее значение интервала $\bar{x}_i$, кг/м^2	Частота η_i	Сумма частот $\Sigma\eta_i$	Вероятность выполнения p, %
371,4–329,7	350,5	2	2	6,7
329,6–288,3	308,9	2	4	13,3
288,2–246,8	267,5	3	7	23,3
246,7–205,3	226,0	10	17	56,7
205,2–163,9	184,5	7	24	80,0
163,8–122,5	143,1	2	26	86,7
122,4–81,1	101,7	4	30	100

Выбор проектной вероятности выполнения количества технологических циклов взаимосвязан с созданием необходимого резерва (25–40%) готовой продукции, то есть объема фрезерного торфа, переходящего потребителю для повышения уровня надежности поставки [5] в неблагоприятные по метеорологическим условиям сезоны.

По каждому сезону рассчитывают возможное выполнение программы добычи фрезерного торфа в процентах по формуле

$$\ddot{I} = \frac{I_{эi}}{I_э} \cdot 100\%,$$

где $I_{эi}$ – суммарная эффективная испаряемость за сезон *i*-го года, кг/м^2; $I_э$ – эффективная испаряемость за сезон при заданной (принятой) вероятности, кг/м^2 (рисунок). При расчете возможной программы выполнения добычи фрезерного торфа суммарная эффективная испаряемость за сезон при вероятности 60% по графику составила 218 кг/м^2. Расчеты по движению резерва фрезерного торфа сводят в таблицу 5.

Таблица 5. Перевыполнение (+) или невыполнение (–) программы, наличие резерва (+) или недопоставка (–) потребителю готовой продукции при вероятности 60%.

Table 5. Overfulfillment (+) or failure to comply with (–) program, a reserve (+) or under-delivery (–) to the consumer of finished products at a probability of 60%.

Годы	Возможное выполнение программы, %	Перевыполнение или невыполнение программы в i-м году, %		Наличие резерва или недопоставка, %	
		+	–	+	–
1	–	–	–	40	–
2	110	10	–	40	–
3	72	–	28	12	–
4	88	–	12	0	–
5	105	5	–	5	–
...					

Таким образом, можно определить возможное движение резерва на основе расчетных показателей эффективной испаряемости при условии образования максимального резерва 40% к первому году эксплуатации со стабильной программой (резерв создают в период развития торфяного производства).

Список литературы

1. *Методика* расчета количества циклов добычи фрезерного торфа и эффективной испаряемости. – Л.: Изд-во ВНИИ торфяной промышленности, 1981. – 44 с.
2. *Методика* определения переходящих запасов и уровня надежности выполнения плана добычи фрезерного торфа. – Л.: Изд-во ВНИИ торфяной промышленности, 1981. – 40 с.
3. *Практическое* руководство по организации добычи фрезерного торфа: Учеб. пособие. – 1-е изд./В.И. Смирнов [и др.]. – Тверь: ТГТУ, 2007. – 392 с.
4. *Браилко, А.А.* Расчет количества циклов при рациональной разработке торфяных месторождений/А.А. Браилко, А.В. Купорова, Н.А. Медведева // Социально-экономические и экологические проблемы горной промышленности, строительства и энергетики: материалы 10-й Международной конференции по проблемам горной промышленности, строительства и энергетики. – Тула, 2014. – С. 226–231.
5. *Яблонев, А.Л.* Особенности транспорта торфа к конечному потребителю /А.Л. Яблонев, О.В. Пухова//Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). – 2010. – № 1. – С. 34–35.

УДК 622.23.05:622.7

Фомин К.В.

Фомин Константин Владимирович, д. т. н., заведующий кафедрой механизации природообустройства и ремонта машин Тверского государственного технического университета (ТвГТУ). Тверь, наб. Афанасия Никитина, 22. fomin_tver@mail.ru

Жигульская А.И.

Жигульская Александра Ивановна, к. т. н., доцент кафедры «Торфяные машины и оборудование» ТвГТУ. Тверь, наб. Афанасия Никитина, 22

ИНЖЕНЕРНАЯ МЕТОДИКА АНАЛИЗА ДИНАМИЧЕСКИХ НАГРУЗОК В ЭЛЕМЕНТАХ ПРИВОДА МАШИН ГЛУБОКОГО ФРЕЗЕРОВАНИЯ

Аннотация. В статье предлагается инженерная методика динамического анализа с учетом специфики формирования нагрузок на рабочем органе и в приводе машины глубокого фрезерования при подготовке торфяной залежи к эксплуатации, учитывающая его упруго-инерционные свойства, характеристику двигателя и случайный характер момента нагружения на фрезе. Представлены выражения для определения спектральной плотности момента в элементах привода, позволяющие получить исходную информацию для прочностного расчета машин глубокого фрезерования.

Ключевые слова: машина глубокого фрезерования, фрезерование торфа, фрезерование кустарника, фрезерование корней, динамический нагрузки, спектральная плотность.

Fomin K.V.

Fomin Konstantin V., prof., Chair, Mechanization of environmental and repair machines,Tver State Technical University

Zhigulska A.I.

Zhigulska Alexandra I., associate Professor , “Peat machines and equipment” Tver State Technical University

ENGINEERING METHODS OF ANALYSIS OF DYNAMIC LOADS IN THE DRIVE ELEMENTS OF DEEP MILLING MACHINES

Abstract. The article offers engineering technique of dynamic analysis taking into account specific key for the formation of stress on your body and in the drive of the machine deep milling in the preparation of peat for use, taking into account elasto-inertial characteristics, a characteristic of the engine and the random nature of the loading moment on the mill. Equations for determining spectrum neutral density point in the drive, allowing to obtain baseline information for the strength calculation deep milling machines.

Key words: machine deep milling, milling peat, milling shrub, milling roots, dynamic loads, spectral density.

Задача повышения надежности машин глубокого фрезерования выдвигает необходимость разработки методов расчета, учитывающих на стадии проектирования конструктивные особенности, условия эксплуатации, величину и характер нагрузки в элементах конструкции. Эти нагрузки могут рассматриваться как результат вынужденных колебаний упругой системы привода от воздействия на исполнительном органе сил внешнего сопротивления, которые являются случайными функциями. Поэтому анализ динамической нагруженности должен выполняться с помощью аппарата статистической динамики [1, 2].

В настоящее время разработаны подходы к анализу динамических нагрузок в приводе машин глубокого фрезерования, учитывающие его упруго-инерционные свойства, характеристику двигателя и случайный характер момента нагружения на рабочем органе [2–4].

С целью обеспечения широкого применения методов динамического анализа в расчетной практике в статье предлагается инженерная методика расчета с учетом специфики формирования нагрузок в элементах конструкции машины глубокого фрезерования при подготовке торфяной залежи к эксплуатации.

Определение спектральной плотности момента нагружения на фрезе

При выполнении технологической операции машиной глубокого фрезерования происходит измельчение торфа совместно с произрастающей на поверхности лесокустарниковой растительностью, ее корневой системой и древесными включениями.

Спектральная плотность суммарного момента равна

$$S_M(\omega) = S_T(\omega) + S_K(\omega) + S_B(\omega) + S_D(\omega),$$

где $S_T(\omega)$, $S_K(\omega)$ – соответственно, спектральные плотности моментов на фрезе при взаимодействии с торфом и корневой системой; $S_B(\omega)$ – сумма взаимных спектральных плотностей моментов при фрезеровании торфа и корневой системы; $S_D(\omega)$ – спектральная плотность момента при взаимодействии с древесными включениями.

При фрезеровании торфа спектральная плотность момента равна [2, 4]

$$S_T(\omega) = \frac{2}{T}\left|S_0(j\omega)\right|^2 \Bigg[MD_A + m_A^2 \sum_{r=-\infty}^{\infty} \frac{\omega\varphi_T}{2\pi r^2} W_\phi\left(\frac{\omega\varphi_T}{2\pi r}\right) \times \sum_{m=1}^{M}\sum_{l=1}^{M} \exp\left(-j\frac{2\pi r}{\varphi_T}(\varphi_m - \varphi_l)\right) + \sum_{m=1}^{M}\sum_{l=1}^{M} K_{Aml} \exp\left(-j\frac{\omega}{\omega_\phi}(\varphi_m - \varphi_l)\right) + \lim_{N\to\infty} 2\sum_{p=1}^{2N}\left(1 - \frac{p}{2N+1}\right) \mathrm{Re} \sum_{m=1}^{M}\sum_{l=1}^{M} K_{Amlp} \exp\left(-j\frac{\omega}{\omega_\phi} \times (\varphi_m - \varphi_l)\right) \exp\left(-j\frac{\omega}{\omega_\phi}\omega p \varphi_T\right)\Bigg], \; r \neq 0, \qquad (1)$$

где T – средний период повторности импульсов, образованных одной плоскостью резания; $S_0(j\omega)$ – спектр функции, описывающей момент нагружения с единичной амплитудой на одиночном режущем элементе при взаимодействии с торфом; M – число плоскостей резания; m_A и D_A – математическое ожидание и дисперсия амплитуд импульсов; φ_T – угол между соседними ножами в плоскости резания; $W_\phi(\omega_\phi)$ – плотность распределения угловой скорости фрезы, определяемая с помощью методики [5]; φ_m – угол сдвига между ножами в m-й и 1-й плоскостях резания; ω_ϕ – угловая скорость фрезы; $K_{Amlp} = K_{Ap}K_{Aml}$; $K_{Ap}(pT)$, K_{Aml} – соответственно, коэффициенты корреляции амплитуд импульсов в направлении движения агрегата и перпендикулярном ему [2].

Выражение (1) может быть упрощено с учетом специфики формирования нагрузки на фрезе [6] для многих расчетных случаев. Если длительность импульса нагружения τ на рабочем органе при взаимодействии режущего элемента с торфом, мало по сравнению с периодом собственных колебаний динамической системы привода T, ($\tau \ll T$), то спектр функции $S_0(j\omega)$ примерно равен постоянной величине, определяемой площадью импульса [7]

$$S_0(j\omega) = \frac{1}{A}\int_0^\tau M_0(t)e^{-j\omega t}dt \approx \frac{1}{A}\int_0^\tau M_0(t)dt, \qquad (2)$$

где A – амплитудное значение импульса; $M_0(t)$ – функция, описывающая изменение момента на

ноже при фрезеровании торфа с амплитудой, равной единице.

Учитывая, что для функции $M_0(t)$ можно записать [2, 8]:

$$M_0(t) = R\delta(t)b\left[\frac{\theta + \sigma tg\psi}{\theta_m + \sigma_m tg\psi_m}k + \frac{\gamma V_p^2}{2.10^3}\right] \text{при } t \le \tau;$$

$M_0(t)$, при $t > \tau$,

где R – радиус фрезы; $\delta(t) = c \sin \omega_ф t$ – изменение толщины стружки по дуге контакта режущего элемента с залежью; c – подача на один режущий элемент; b – ширина режущего элемента; k – коэффициент резания торфа [8]; γ – плотность торфа; V_p– скорость резания; θ – текущее значение структурного сцепления торфа; ψ – угол внутреннего трения; σ – нормальное давление в плоскости резания; θ_m, ψ_m, σ_m – соответственно, средние значения θ, ψ, σ, для $S_0(j\omega)$ получим

$$S_0(j\omega) = \tau\delta_{ср}, \quad (3)$$

где $\delta_{cp} = \frac{1}{\tau}\int_0^\tau \delta(t)dt$ – средняя толщина стружки.

Соответственно, амплитудное значение импульса

$$A = Rbc\left[k\frac{\theta + \sigma tg\psi}{\theta_m + \sigma_m tg\psi_m} + \frac{\gamma V_p^2}{2.10^3}\right],$$

а вероятностные характеристики амплитуд импульсов равны:

$$m_A = Rbc\left(k + \frac{m_\gamma V_p^2}{2.10^3}\right),$$

$$D_A = R^2b^2c^2\left(k_T^2\frac{D_\theta}{(\theta_m + \sigma_m tg\psi_m)^2} + \frac{D_\gamma V_p^2}{4.10^6}\right), \quad (4)$$

где D_γ, D_θ – дисперсия плотности и структурного сцепления торфа; m_γ – математическое ожидание плотности торфа.

Предполагая независимость величин θ и γ для корреляционной функции амплитуд импульсов в направлении движения агрегата, получим:

$$K_{Ap}(pT) = R^2b^2c^2\left\{k_T\frac{K_{\theta//}(pT)}{(\theta_m + \sigma_m tg\psi_m)^2} + \frac{K_{\gamma//}(pT)V_p^4}{4.10^6}\right\};$$

для корреляционной функции амплитуд импульсов в направлении, перпендикулярном движению агрегата,

$$K_{Aml}[(m-l)l_m] = R^2b^2c^2\left[k_T\frac{K_{\theta T}[(m-l)l_m]}{(\theta_m + \sigma_m tg\psi_m)^2} + \frac{K_{\gamma T}[(m-l)l_m]V_p^4}{4\cdot 10^6}\right],$$

где l_m – расстояние между первой и m-й плоскостями резания; $K_{\theta//}$, $K_{\gamma//}$ – корреляционные функции изменения θ и γ в направлении движения агрегата; $K_{\theta T}$, $K_{\gamma T}$ – корреляционные функции изменения θ и γ в направлении, перпендикулярном движению агрегата.

Спектральная плотность момента на фрезе $S_K(\omega)$ может быть определена как [9]

$$S_K(\omega) = \frac{2m_1\{S\}}{T}[M\Psi_1(\omega) - M\Psi_2(\omega) + m_1\{S\}\sum_{r=-\infty}^{\infty}\Psi_3\left(\frac{2\pi r}{\varphi_T}\right)\sum_{m=1}^{M}\sum_{l=1}^{M}\exp\left(-j\frac{2\pi r}{\varphi_T}(\varphi_m - \varphi_l)\right)\times \frac{\omega\varphi_T}{2\pi r^2}W_ф\left(\frac{\omega\varphi_T}{2\pi r}\right)\Bigg], \; r \ne 0,$$

где $m_1\{S\} = \lambda_{кор}bH$ – среднее число импульсов нагрузки на режущем элементе в пределах угла контакта с торфом; $\lambda_{кор}$ – среднее число корней, приходящихся на единицу площади (в вертикальном сечении); H – глубина фрезерования;

$$\Psi_1(\omega) = \int_{-\infty}^{\infty} K_{2K}(\omega;\omega_ф)W_ф(\omega_ф)d\omega_ф,$$

где

$$K_{2K}(\omega;\omega_ф) = \int_{-\infty}^{\infty}\left|S_{0s}(j\omega;P_s;\omega_ф)\right|^2 w(P_s)dP_s;$$

$$\Psi_2(\omega) = \int_{-\infty}^{\infty}\left|K_K(\omega;\omega_ф)\right|^2\left|\theta_{ts}(j\omega;\omega_ф)\right|^2 W_ф(\omega_ф)d\omega_ф;$$

$$\Psi_3(\omega) = \left|K_K(\omega;\omega_ф)\right|^2\left|\theta_{ts}(j\omega;\omega_ф)\right|^2,$$

где $K_K(\omega;\omega_ф) = \int_{-\infty}^{\infty} S_{0s}(\omega;P_s;\omega_ф)w(P_s)dP_s;$

$w(P_s)$ – плотность распределения параметров импульсов при взаимодействии с корнями; $\omega_ф$ – угловая скорость вращения фрезы; $\theta_{ts}(j\omega)$ – характеристическая функция времени

от начала взаимодействия режущего элемента с торфом до момента взаимодействия с s-м корнем; $S_{0s}(j\omega)$ – спектр импульса нагружения при одиночном акте взаимодействия с корнем.

Учитывая малую длительность взаимодействия режущего элемента с корнем τ_{ks} (то есть, если $\tau_{ks} << T$), для $S_{0s}(j\omega)$ можно записать

$$S_{0s}(j\omega) = \int_0^{\tau_{ks}} M_s(t; P_s; \omega_ф)\exp(-j\omega t)dt \approx$$

$$\approx \int_0^{\tau_{ks}} M_s(t; P_s; \omega_ф)dt,$$

где τ_{ks} – длительность взаимодействия с s-м корнем; $M_s(t)$ – функция, описывающая момент нагружения на ноже в s-м акте взаимодействия с корнями.

Используя результаты, полученные в [10] для $S_{0s}(j\omega)$, имеем

$$\int_0^{\tau} M_s(t; P_s; \omega_ф)dt \approx \tau_c \frac{\pi^2 d^3}{32\omega_ф} \frac{1}{\sin(\varphi_d - \varepsilon_в)\cos\varepsilon_г},$$

где τ_c – удельное сопротивление древесины резанию; d – диаметр корня; φ_d – угол поворота фрезы, при котором происходит встреча с корнем в пределах угла взаимодействия с залежью, который связан с его глубиной относительно поверхности h:

$$\cos\varphi_d = \frac{R_ф - (H - h)}{R_ф},$$

где H – глубина фрезерования; $R_ф$ – радиус фрезы по концам режущих элементов; $\varepsilon_в$, $\varepsilon_г$ – соответственно, отклонение положения корня в вертикальном и в горизонтальном направлениях в момент взаимодействия с режущим элементом.

Усредняя выражение $S_{0s}(j\omega)$ по случайным параметрам τ_c, d, φ_d, $\varepsilon_в$, $\varepsilon_г$ с учетом их независимости для $K_K(\omega, \omega_ф)$, получим

$$K_K(\omega; \omega_ф) = \int_{-\infty}^{\infty} S_{0s}(\omega; P_s; \omega_ф) w(P_s) dP_s =$$

$$= \frac{\pi^2}{32\omega_ф} m_1\{\tau_c\}(m_d^3 + 3\sigma_d^2 m_d) K_h K_{\varepsilon в} K_{\varepsilon г},$$

где $m_1\{\tau_c\}$ – среднее значение удельного сопротивления древесины резанию; m_d, σ_d – соответственно среднее и среднеквадратическое отклонение диаметров корней и стволов лесокустарниковой растительности;

$$K_{\varepsilon г} = m_1\left\{\frac{1}{\cos\varepsilon_г}\right\} = \int_{-\infty}^{\infty} \frac{1}{\cos\varepsilon_г} w(\varepsilon_г) d\varepsilon_г,$$

$$K_h K_{\varepsilon в} = m_1\left\{\frac{1}{\sin(\varphi_d - \varepsilon_в)}\right\} =$$

$$= \int_{-\infty}^{\infty}\int_{-\infty}^{\infty} \frac{1}{\sin(\varphi_d - \varepsilon_в)} w(h) w(\varepsilon_в) dh d\varepsilon_в,$$

где $w(\varepsilon_г)$, $w(\varepsilon_в)$, $w(h)$ – соответственно, плотности распределения отклонения положения корня в горизонтальном направлении в момент взаимодействия с режущим элементом, положения корня в вертикальном направлении и глубины залегания корней.

Сумма взаимных спектральных плотностей равна [9]

$$S_B(\omega) = \frac{2m_1\{S\}}{T} \sum_{r=-\infty}^{\infty} \left[K_T\left(\frac{\omega\varphi_T}{2\pi r}\right) K_K^*\left(\frac{\omega\varphi_T}{2\pi r}\right) \times \right.$$

$$\left. \times \theta_{ts}\left(\frac{\varphi_T}{2\pi r}\right) + K_K\left(\frac{\omega\varphi_T}{2\pi r}\right) K_T^*\left(\frac{\omega\varphi_T}{2\pi r}\right) \theta_{ts}^*\left(\frac{\varphi_T}{2\pi r}\right) \right] \times$$

$$\times \sum_{m=1}^{M}\sum_{l=1}^{M} \exp\left(-j\frac{2\pi r}{\varphi_T}(\varphi_m - \varphi_l)\right) \frac{\omega\varphi_T}{2\pi r^2} W_ф\left(\frac{\omega\varphi_T}{2\pi r}\right),$$

при r ≠0,

где, с учетом выражений (2–4) $K_T(\omega; \omega_ф) = m_A S_0(\omega)$.

Спектральная плотность момента на рабочем органе при фрезеровании древесных включений равна [3, 11]

$$S_D(\omega) = 2\lambda \sum_{i=1}^{I}\sum_{l}^{L_1}\sum_{m=1}^{M_1} P_i P_{dm} P_{Hl} |S_{iml}(j\omega)|^2,$$

где λ – число древесных включений, попадающих на рабочий орган в единицу времени; I – число типов взаимодействия рабочего органа с древесными включениями (расположение пня по отношению к фрезе, форма пня); L_1, M_1 – число интервалов, на которые разбиты плотности распределений размеров древесных включений $W(d)$ и их глубин залегания $W(H)$; P_i – вероятность взаимодействия с древесным включением i-й формы; $S_{iml}(j\omega)$ – спектр момента на фрезе при взаимодействии с древесным включением i-й формы, диаметром d_m и глубиной залегания H_l [2]. Значения P_{dm} и P_{Hl} равны [11]

$$P_{dm} = \int_{d_m}^{d_{m+1}} W(d) dd,$$

$$P_{Hl} = \int_{H_l}^{H_{l+1}} W(H)dH.$$

Определение спектральной плотности момента нагружения в элементах привода машины глубокого фрезерования

Привод торфяного фрезерующего агрегата можно рассматривать в виде колебательной системы с сосредоточенными параметрами (массами), соединенными невесомыми связями, являющимися нелинейными и обладающими упругодемпфирующими свойствами [2, 12]. Структура динамической системы определяется кинематической схемой привода.

При выполнении технологической операции система уравнений, описывающая динамические процессы в приводе, имеет вид:

$$\begin{cases} I_1\ddot{\varphi}_1 + M_{c1}(\varphi_1 - \varphi_2; \dot{\varphi}_1 - \dot{\varphi}_2; t) = M_\partial(\dot{\varphi}_1; \varphi_1) \\ \cdots\cdots\cdots\cdots\cdots \\ I_i\ddot{\varphi}_i - M_{ci-1}(\varphi_{i-1} - \varphi_i; \dot{\varphi}_{i-1} - \dot{\varphi}_i; t) + M_{ci}(\varphi_i - \varphi_{i+1}; \dot{\varphi}_i - \dot{\varphi}_{i+1}; t) = 0 \\ \cdots\cdots\cdots\cdots\cdots \\ I_n\ddot{\varphi}_n - M_{cn}(\varphi_{n-1} - \varphi_n; \dot{\varphi}_{n-1} - \varphi_n; t) = M_n(\dot{\varphi}_n; \varphi_n) \end{cases},$$

где I_i, φ_i – соответственно, моменты инерции и углы закрутки сосредоточенных масс; $M_c(\dot{\varphi}; \varphi; t)$, $M_\partial(\dot{\varphi}; \varphi)$, $M_n(\dot{\varphi}; \varphi)$ – соответственно, моменты упругости валов, моменты двигателя и сопротивления на рабочем органе.

Наиболее просто динамический анализ проводится для линейной модели динамической системы. При этом предполагается, что колебание скорости вращения коленчатого вала двигателя находится в пределах нечувствительности регулятора, а момент в i-м элементе привода равен

$$M_{ci}(\varphi_i - \varphi_{i+1}; \dot{\varphi}_i - \dot{\varphi}_{i+1}; t) = \\ = C_i(\varphi_i - \varphi_{i+1}) + \beta_i(\dot{\varphi}_i - \dot{\varphi}_{i+1}),$$

где C_i – жесткость i-го элемента; β_i – коэффициент неупругого сопротивления i-го элемента.

Опыт применения методов динамического анализа для машин глубокого фрезерования различных типов [2, 12, 13] показывает, что существенным оказывается учет двух первых собственных частот динамической системы привода. Поэтому для инженерных расчетов достаточно ограничиться его трехмассовой моделью (методы получения упрощенных расчетных схем представлены в [14]). В этом случае значения собственных частот могут быть определены из уравнения [15]

$$\omega_c^4 - \left(C_1\frac{I_1 + I_2}{I_1 I_2} + C_2\frac{I_2 + I_3}{I_2 I_3}\right)\omega_c^2 + \\ + \frac{I_1 + I_2 + I_3}{I_1 I_2 I_3} C_1 C_2 = 0.$$

При этом формы собственных колебаний [15]:

$$a_1 = 1;\ a_2 = 1 - \frac{I_1\omega_c^2}{C_1};\ a_3 = \frac{C_2 a_2}{C_2 - I_3\omega_c^2}.$$

Спектральная плотность момента нагружения в i-м элементе равна

$$S_i(\omega) = S_M(\omega)(C_i + \beta_i\omega)^2 \sum_{p=1}^{2} \frac{a_{np}^2\left(a_{i;p} - a_{i+1;p}\right)^2}{M_p^2} \times \\ \times \frac{1}{\left(\omega_{op}^2 - \omega^2\right)^2 + 4n_p^2\omega^2},$$

где a_{np} – p-я форма собственных колебаний масс привода, к которой приложена нагрузка; a_{ip}; a_{i+1};p – формы собственных колебаний масс привода, между которыми расположен i-й упругий элемент;

$$M_p = a_{1p}^2 I_1 + a_{2p}^2 I_2 + .a_{3p}^2 I_3,$$

$$n_p = \frac{1}{M_p}\sum_{s;r=1}^{K}\beta_r a_{rp} a_{r+1;p},$$

$$\omega_{op}^2 = \omega_p^2 + n_p^2,$$

где ω_p – p-я собственная частота системы.

На основании динамического анализа производится оценка применимости линейной модели привода по условию раскрытия зазоров и влияния нелинейности характеристики двигателя [16]. В случае необходимости учета нелинейных свойств используется метод статистического моделирования [1, 2].

Спектральная плотность момента нагружения служит исходной информацией для прочностного расчета элементов привода машин для глубокого фрезерования.

Библиографический список

1. *Докукин, А.В.* Статистическая динамика горных машин / А.В. Докукин, Ю. Д. Красников, З.Я. Хургин. – М.: Машиностроение, 1978. – 238 с.
2. *Самсонов, Л.Н.* Элементы статистической динамики торфяных фрезерующих агрегатов /Л.Н. Самсонов, К.В. Фомин. Учебное пособие для вузов. – Тверь: ТГТУ, 2005. – 168 с.
3. *Фомин, К.В.* Научные основы статистической динамики торфяных фрезерующих агрегатов: Дисс. … д. т. н. Тверь: ТГТУ, 2002. – 330 с.
4. *Самсонов, Л.Н.* Определение вероятностных характеристик момента нагружения на рабочем органе торфяного фрезерующего агрегата/Л.Н. Самсонов, К.В. Фомин // Известия высших учебных заведений. Горный журнал. – 2003. – № 3. – С. 106–112.
5. *Самсонов, Л.Н.* Оценка работы двигателя трактора при эксплуатации торфяного фрезерующего агрегата / Л.Н. Самсонов, К.В. Фомин // Торф в решении проблем энергетики, сельского хозяйства и экологии. Материалы международной конференции. – 2006. – С. 66–68.
6. *Самсонов, Л.Н.* Анализ характера нагружения на рабочем органе торфяного фрезерующего агрегата / Л.Н. Самсонов, К.В. Фомин // Развитие механики торфа и научных основ создания машин и оборудования торфяного производства. Материалы научно-технической конференции: ТГТУ, 2001. – С. 106–110.
7. *Харкевич, А.А.* Спектры и анализ. – М.: ГИТТЛ, 1968. – 190 с.
8. *Солопов, С.Г.* Торфяные машины и комплексы / С.Г. Солопов, Л.О. Горцаколян, Л.Н. Самсонов, В.В. Цветков. Учебное пособие для вузов. – М: Недра, 1981. – 416 с.
9. *Фомин, К.В.* Расчет спектральной плотности момента нагружения на рабочем органе машины глубокого фрезерования на стадии проектирования / К.В. Фомин, А.И. Жигульская // Наука и образование. Электронное научно-техническое издание. – МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2014. – № 5. – С. 70–84. DOI: 10.7463/0514.0709758.
10. *Фомин, К.В.* Определение удельного расхода энергии при взаимодействии рабочего органа машины глубокого фрезерования с торфяной залежью при подготовке ее к эксплуатации / К.В. Фомин, А.И. Жигульская // Труды ИНСТОРФА. – 2013. – № 8 (61). – С. 33–39.
11. *Фомин, К.В.* Моделирование нагрузки на рабочем органе торфяного фрезерующего агрегата при взаимодействии с древесными включениями // Сборник научных трудов молодых ученых ТГТУ. – Тверь, 1998. – С. 51–54.
12. *Фомин, К.В.* Моделирование и анализ динамических нагрузок в элементах привода торфяного фрезерующего агрегата // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). – 2002. – № 9. – С. 189–191.
13. *Самсонов, Л.Н.* Анализ нагрузок в элементах привода фрезерующего агрегата МП-20/ Л.Н. Самсонов, А.К. Кочедыков, К.В. Фомин // Технология и комплексная механизация торфяного производства, сб. – Тверь, 2000. – С. 120–123.
14. *Ривин, Е.И.* Динамика привода станков. – М.: Машиностроение, 1966. – 204 с.
15. *Маслов, Г.С.* Расчеты колебаний валов / Г.С. Маслов. – М.: Машиностроение, 1980. – 152 с.
16. *Фомин, К.В.* Методика анализа динамических нагрузок в элементах привода торфяного фрезерующего агрегата / К.В. Фомин, Л.Н. Самсонов // Вестник Тверского государственного технического университета. – 2002. – № 1. – С. 10–15.

УДК 622.331.002.5

Яблонев А.Л.

Яблонев Александр Львович, д. т. н., проф. кафедры «Торфяные машины и оборудование Тверского государственного технического университета (ТвГУ). Тверь, ул. Академическая, 12. alvovich@mail.ru

Скориков А.Ю.

Скориков Андрей Юрьевич, магистрант кафедры «Торфяные машины и оборудование» ТвГТУ. andre2293@mail.ru

ДЕФОРМИРОВАНИЕ ТОРФЯНОЙ ЗАЛЕЖИ ШТАМПАМИ И ХОДОВЫМИ УСТРОЙСТВАМИ МАШИН В СВЕТЕ ОБЩЕЙ ТЕОРИИ МЕХАНИКИ ГРУНТОВ

Аннотация. Представлены основные этапы и процессы при деформировании грунтов. Описаны модели, применяемые к интерпретации процессов деформирования грунтов. Показаны существенные отличия процессов деформирования торфяной залежи от других связных горных пород. Изложены принципы определения несущей способности торфяной залежи под штампами и ходовыми устройствами машин.

Ключевые слова: давление, несущая способность, штамп, механика грунтов, торфяная залежь, эпюра, гусеничный ход, пневмоколесный ход, торфяная машина.

Yablonev A.L.

Yablonev Alexander L., Prof. Department of Peat Machinery Tver State Technical University. Tver, Academicheskaya, 12

Skorikov A.Yu.

Skorikov Andrei Y., graduate student of the Department Peat Machines and Equipment TSTU. andre2293@mail.ru

DEFORMATION OF PEAT DEPOSIT STAMPS AND RUNNING MACHINES DEVICES IN THE LIGHT OF THE GENERAL THEORY OF SOIL MECHANICS

Abstract. The basic steps and processes in soil deformation are presented. The models used to describe processes of deformation of soils are describes. Significant differences in deformation processes of peat deposit from other messengers of rock are showing. The principles determining the bearing capacity of peat deposit under stamps and devices running machines are set up.

Key words: pressure, load bearing capacity, stamp, soil mechanics, peat deposit, plot, truck, pneumatic wheel running, peat machine.

Изучение закономерностей деформирования горных пород имеет не только теоретическую, но и вполне практическую (прикладную) значимость. Так как слабые грунты разрабатываются машинами, то вопросы проходимости машин при заданных грунтовых условиях полностью определяют производственный процесс разработки. А проходимость машин, как опорная, так и геометрическая, неразрывно связана с деформированием поверхностей, на которых призваны работать машины.

Среди этапов деформирования грунтов можно выделить следующие: приложение нагрузки на штамп или опорно-ходовое устройство; уплотнение грунта с одновременным погружением штампа в грунт (осадка); выпирание части грунта по периметру штампа в виде валиков; равновесие штампа на грунте. Причем равновесие достигается лишь в том случае, когда давление под штампом не превышает несущей способности грунта. В противном случае штамп продолжает погружаться в грунт и, в конце концов, проваливается (тонет).

Уплотнение грунта как трехфазной структуры, состоящей из твердого вещества, воды и газов, обеспечивается вытеснением из пор газов (снижением пористости), отжатием по капиллярным каналам воды и более плотной укладкой твердых частиц. Образование выпирающих валиков по периметру штампа связано с появлением горизонтальных сдвигающих напряжений, разрушающих каркас и структурные связи между частицами. Давление, которое создается под штампом, зависит не только от приложенной нагрузки, но и от площади контактной поверхности штампа. Несущая способность грунта, в свою очередь, определяется качественными характеристиками грунта, формой штампа и размером приложенной нагрузки. Таким образом, основная закономерность, знание которой требуется как при строительстве зданий, так и при эксплуатации машин в условиях конкретного грунта, – зависимость давления под опорной поверхностью P от осадки опорной поверхности в грунте H при приложении нагрузки Q. Примерный вид зависимости осадки штампа от возрастающего давления вследствие увеличения нагрузки представлен на рис. 1 [1].

На рисунке можно выделить три фазы (по Н.М. Герсеванову). Первая фаза соответствует

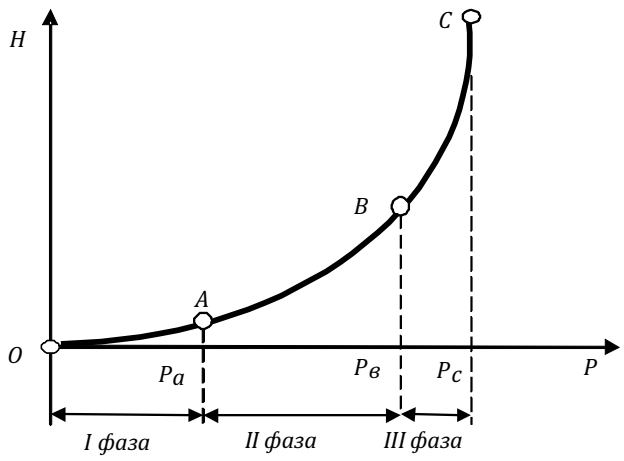


Рис. 1. Фазы деформирования грунта при приложении нагрузки

Fig. 1. Phases of deformation of the ground under the load application

процессам уплотнения грунта. Осадки здесь невелики, зависимость практически линейная, явление сдвига полностью отсутствует. Наиболее выражены упругие свойства грунта. Вторая фаза, начинающаяся при дальнейшем увеличении нагрузки, связана с возникновением сдвига слоев грунта и пластическим деформированием. На этом участке кривая H = f(P) является более крутонаклонной с ярко выраженной заметной криволинейностью. Если продолжать увеличивать нагрузку, то зоны местных сдвигов образуют сплошную поверхность скольжения, по которой происходит выпирание грунта из-под площади штампа, начинается «течение» грунта, сопровождающееся резким погружением штампа в грунт. В этом заключается суть процессов, происходящих в третьей фазе – фазе нарушения устойчивости, текучести и разрушения.

Все деформации грунтов условно делятся на упругие и неупругие [2]. При наличии структурного сцепления между частицами (глины, суглинки), грунты даже при циклических воздействиях (вибрациях, сотрясениях и т. д.) можно рассматривать как упругие тела до нагрузки, разрушающей структурные связи. Для описания процессов деформирования грунта в механике грунтов наибольшее распространение получили две модели: модель основания Фусса–Винклера в несколько измененном виде представленная, как модель Бернштейна–Летошнева, и модель линейно-деформируемого полупространства.

Модель Фусса–Винклера рассматривает грунт как несколько не связанных между собой пружин (постель), опирающихся на жесткое горизонтальное основание (рис. 2). Сжатие пружин Н (осадка штампа) возрастает прямо пропорционально давлению Р:

$$P = KH, \quad (1)$$

где К – коэффициент пропорциональности, или упругости грунта (коэффициент постели).

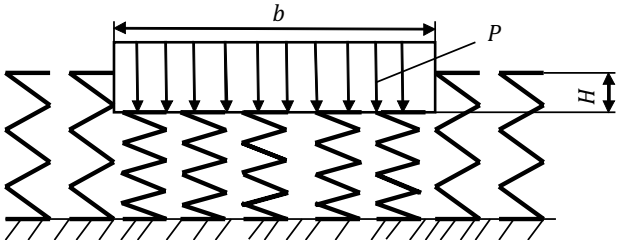


Рис. 2. Модель основания Фусса–Винклера

Fig.2. Fuss–Winkler foundation model

Эпюра давлений расположена только под штампом шириной b и не выходит за его границы (рис. 3). Считается, что грунт, расположенный сбоку и не участвующий в сжатии (осадке), не испытывает на себе и давления. Форма эпюры может быть различной, в зависимости от характера и интенсивности нагрузки штампа.

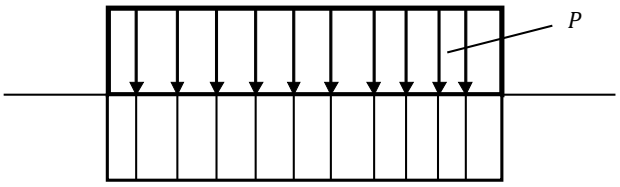


Рис. 3. Эпюра давлений от штампа, лежащего на основании Фусса–Винклера

Fig. 3. Pressure plot stamp on the basis of Fuss–Winkler foundation

Однако прямая пропорциональность между давлением и осадкой нарушается при больших нагрузках и малых площадях опорной поверхности, что корректируется гипотезой Бернштейна–Летошнева, которая учитывает изменение сопротивления грунта:

$$P = K\left({}^{H}/_{H_o}\right)^{\beta}, \quad (2)$$

где H – текущая осадка штампа; H_o – начальная осадка штампа (на момент начала измерений); β – показатель степени, принимающий значение для поверхностных слоев 1.

Зависимость (2) часто применяется в теории образования колеи от мобильных машин [1], передвигающихся по слабым грунтам, и позволяет описать кривую вдавливания в более широком диапазоне осадочных деформаций, чем (1) . Большое количество опытов, проведенных советскими учеными Н.М. Герсевановым, Н.А. Цытовичем, О.А. Савиновым и др., показывает, что коэффициент упругости грунта не является постоянной величиной, а зависит от давления на грунт и площади опоры. Поэтому данную модель целесообразно применять в условиях относительно постоянных опорных поверхностей и давлений на грунт.

Модель линейно-деформируемого полупространства представляет грунт как бесконечное сплошное линейно-деформируемое тело, неограниченное глубиной и горизонтом, но ограниченное сверху горизонтальной плоскостью (отсюда – название «полупространство»). Давление от штампа передается здесь на все полупространство, поэтому осадке подвергаются также участки, расположенные рядом со штампом (рис. 4).

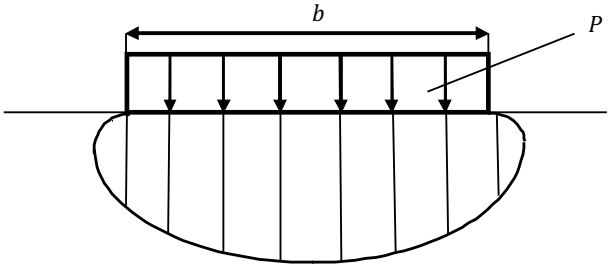


Рис. 4. Вид эпюры вертикальных давлений от штампа шириной b в модели линейно-деформируемого полупространства

Fig. 4. Type of plot vertical pressures from stamp width b linear-deformable surface model

Основной зависимостью, связывающей давление и осадку штампа, является здесь следующая [2]:

$$H = {}^{\omega P b(1-\mu^2)}/_{E}, \quad (4)$$

где ω – коэффициент формы штампа, зависящий от соотношения его сторон; μ – коэффициент общей относительной поперечной деформации (Пуассона); E – модуль упругости (деформируемости) полупространства.

Как видно, величина деформации грунта зависит от давления, характеристик механической прочности грунта (E; μ) и не только от линейных размеров, но и от формы штампа (ω). Данные о коэффициенте формы штампа для различных плоских квадратных, прямоугольных и круглых штампов широко представлены в работе [3]. В области механики грунтов на основе этой модели получено много зависимостей и закономерностей: о распределении давления в толще грунта и на поверхности контакта грунта с опорной поверхностью, о соотношении нормальных и тангенциальных напряжений и т. д. Следует также отметить, что модель весьма уместна при рассмотрении случая, когда площадь контактных поверхностей опор с грунтом является переменной, или когда необходимо знать значения осадки грунта не только под штампом (опорой), но и рядом с ним.

Обе описанные модели широко используются в теории механики грунтов и применяются с учетом конкретных условий, однако представляют лишь линейную зависимость между давлением и осадкой, что наиболее характерно для первой фазы деформирования грунта (рис. 1).

Торфяная залежь имеет несколько свойств, близких всем остальным минеральным грунтам: угол внутреннего трения φ = 5–35°, сцепление частиц друг с другом, способность к набуханию и усадке (консолидации) и др. Однако высокая пористость (наличие как крупных, так и микропор), влажность, близкая к 100%, и значительная сжимаемость (в сотни раз превышающая сжимаемость песка) существенно отличают торфяную залежь от всех остальных минеральных грунтов [3]. Так, например, при деформировании под нагрузкой не происходит бокового выпирания вследствие смещения торфяных частиц из-под опорной поверхности. Вместо этого можно наблюдать изначальный упругий прогиб верхних слоев, после чего, по мере увеличения нагрузки, происходит их вертикальный срез по периметру штампа, который, однако, приводит не к окончательной потере устойчивости, а лишь к следующей ступени уплотнения породы вследствие пластической деформации. Кроме того, с течением времени вокруг штампа образуется трещина в торфяном массиве, расположенная по контуру штампа и на некотором расстоянии от него (рис. 5), ведущая к образованию новых вертикальных поверхностей.

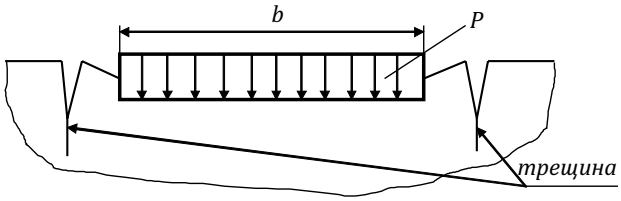


Рис. 5. Образование трещины в торфяной залежи под нагрузкой с течением времени

Fig. 5. Cracks formation in the peat deposit under load over time

Торфяная залежь работает на сжатие и срез, в отличие от песков и глин, работающих на сжатие и выпирание [3]. Поэтому несущая способность залежи определяется не только площадью, но формой и периметром штампа. Чем меньше периметр штампа (поверхность среза), тем меньше сопротивление срезу и несущая способность залежи. Эта закономерность выражается, по С.С. Корчунову, общим уравнением несущей способности залежи [4]:

$$P_o = A_o + B_o \, {}^{П}/_{S}, \qquad (5)$$

где P_o – несущая способность торфяной залежи, кПа; A_o и B_o – константы торфяной залежи, характеризующие ее сопротивление смятию (сжатию), кПа и срезу, кПа·м, соответственно; $П$ – периметр штампа, м; S – площадь штампа, м^2.

Анализ зависимости (5) показывает, что поверхности с большей опорной площадью имеют меньшую несущую способность, что совершенно не свойственно минеральным грунтам. Так, при возрастании диаметра штампа его площадь увеличивается в квадратичной зависимости, а периметр – в линейной, следовательно, несущая способность уменьшается. Кроме того, несущая способность более узких поверхностей выше, чем широких при той же площади. Выбор допускаемого давления базируется на зависимости (5) с учетом запаса, неоднородности залежи и разных условий эксплуатации. При этом вместо A_o и B_o в формулу вводятся $A_д$ и $B_д$. На рис. 6 представлена зависимость допускаемого давления от соотношения $П/S$, полученная для различных условий эксплуатации шести квадратных штампов со стороной: 0,1; 0,25; 0,5; 1,0; 1,5; 2,0 м. Здесь и далее учтены условия работы:

ряд 1 – на полях добычи торфа; ряд 2 – при ремонте полей после предварительного осушения; ряд 3 – на неосушенной залежи.

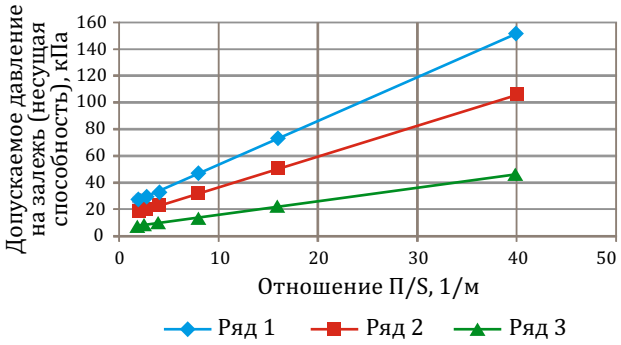


Рис. 6. Зависимость допускаемого давления на залежь (несущей способности) от соотношения периметра и площади квадратного штампа

Fig. 6. The dependence of permissible pressure on deposit (load bearing capacity) of the ratio of perimeter and area of a square stamp

Из рис. 6 видно, что при увеличении отношения $П/S$ в 20 раз для квадратных штампов (от 2 до 40 м$^{-1}$) несущая способность штампа на залежи повышается в среднем в 5,72 раза. В то же время по графикам, представленным на рис. 7, можно оценить влияние площади опорной поверхности на допускаемое давление для тех же условий и штампов: при уменьшении площади опорной поверхности квадратных штампов в 400 раз (с 4 до 0,01 м^2) несущая способность повышается в среднем в 5,72 раза. Причем при площади опорной поверхности штампа менее 0,25 м^2 несущая способность залежи начинает расти в геометрической прогрессии.

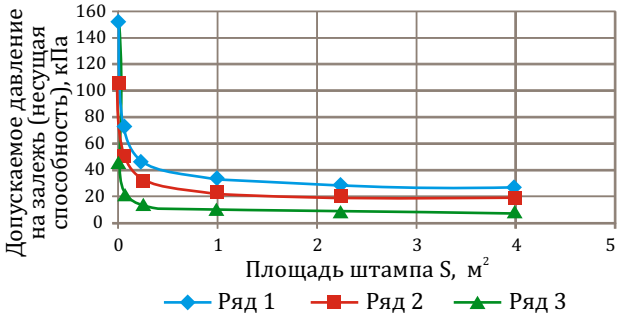


Рис. 7. Зависимость допускаемого давления на залежь (несущей способности) от площади квадратного штампа

Fig. 7. The dependence of permissible pressure on deposit (load bearing capacity) of the area of the square stamp

Для сравнения было рассмотрено деформирование торфяной залежи круглыми штампами с площадью аналогичной квадратным. Результаты отражены на рис. 8 и 9.

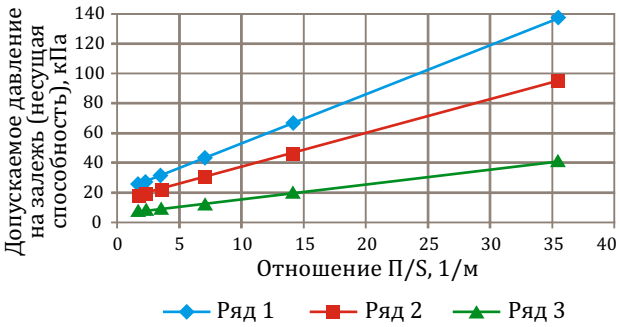


Рис. 8. Зависимость допускаемого давления на залежь (несущей способности) от соотношения периметра и площади круглого штампа

Fig. 8. The dependence of permissible pressure on deposit (load bearing capacity) of the ratio of perimeter and area of a round stamp

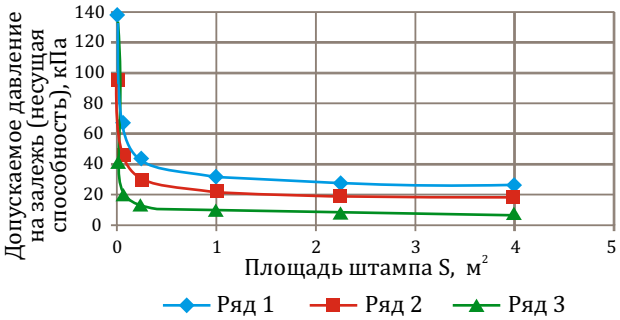


Рис. 9. Зависимость допускаемого давления на залежь (несущей способности) от площади круглого штампа

Fig. 9. The dependence of permissible pressure on deposit (load bearing capacity) of the area round stamp

Анализ рисунков 8–9 показывает следующее. При увеличении отношения $П/S$ в 20 раз для круглых штампов (от 1,773 до 35,5 м$^{-1}$) несущая способность залежи под штампом повышается в среднем в 5,31 раза, во столько же раз она понижается при увеличении площади круглого штампа в 400 раз (с 0,01 до 4,0 м^2). При площади круглого штампа менее 0,25 м^2 начинается прогрессивный рост несущей способности залежи под штампом.

Такой, казалось бы на первый взгляд, парадокс, связанный с огромной ролью периметра

штампа в формировании несущей способности торфяной залежи совершенно несвойственен минеральным грунтам, даже имеющим внутреннее сцепление.

Сопоставление результатов для квадратных и круглых штампов обнаруживает некоторые закономерности: торфяная залежь под круглым штампом имеет меньшую несущую способность во всем рассмотренном диапазоне; интенсивность возрастания несущей способности при уменьшении отношения $П/S$ у круглых штампов меньше, чем у квадратных; при использовании штампов площадью менее 0,25 м^2 начинается интенсивной рост несущей способности залежи под штампами при всех рассмотренных условиях.

Исследуя зависимость фаз деформирования торфяной залежи под штампами (рис. 1), А.Г. Гинцбург пришел к выводу, что данную зависимость можно представить в виде трех ломаных линий: *OA*, *AB* и *BC*. Если давление, которое оказывает гусеничная машина на залежь меньше P_a – возможен многократный проход машины по следу. Если давление больше P_a, но меньше $P_в$, возможен только однократный проход машины по следу с образованием глубокой неисчезающей колеи. Давления P_a и $P_в$ им предложено назвать, соответственно, пределами длительной и временной несущей способности. При этом после стабилизации всех осадочных процессов и снятия напряжения восстанавливающаяся осадка составляет около 30…45% полной осадки [3], что в значительной степени характеризует торфяную залежь как упругое тело.

Большая серия проведенных штамповых испытаний [3] показала, что при увеличении степени разложения торфа с 25 до 50%, с уменьшением в их структуре волокон, создающих арматурный каркас и обеспечивающих упругие свойства, сопротивление деформированию залежей значительно понижается. Так, для круглых штампов осадка увеличивалась в 1,3–1,6 раза, а для прямоугольных – в 2,5–3 раза. Причем срез по периметру плоского штампа для волокнистых торфов наблюдался при давлениях 30–40 кПа, а до этого момента торф лишь прогибался у краев штампа. Вместе с тем, как отмечает Л.С. Амарян, повышенное содержание волокнистой массы оказывает одновременно и отрицательное влияние на механические свойства залежей, так как наличие в волокнах множества пор является причиной скопления в них большого количества влаги, препятствующей уплотнению и упрочнению системы при внешних давлениях [5]. Проведя около 3000 испытаний для образцов верхового и 1700 для низинного типа торфяных залежей, методом статистической обработки автор получил наиболее вероятные значения прочности $\tau_в$: 15,4 кПа для низинных и 11,0 кПа для верховых залежей.

Попытка «примирить» существующие вышеописанные модели деформирования грунтов предпринята для торфяных залежей в работе [6]. Решая уравнения (1) и (3) относительно H и приравняв их правые части, авторы численными методами нашли закономерности, по которым определяется дифференцированное значение коэффициента упругости торфяной залежи в зависимости от формы штампа, что для модели Фусса–Винклера является существенным шагом вперед, так как ранее давление определялось лишь площадью контактной поверхности.

Однако, как и в большинстве случаев, все эти исследования касаются лишь плоских штампов круглой, квадратной и прямоугольной формы. Полученными данными удобно пользоваться для описания контактов фундаментов зданий и гусениц машин с торфяной залежью. Ведь в общем случае и с известными допущениями гусеница машины есть не что иное, как прямоугольный штамп. Но при исследовании взаимодействия с залежью колес машин, ввиду непостоянства площади контактной поверхности, возникают трудности. Случай жестких металлических колес и легкодеформируемой залежи сравнительно просто поддается описанию. Когда же деформируются одновременно и эластичное резиновое колесо, и торфяная залежь – трудности возрастают во много раз.

Описание процесса взаимного деформирования пневматического колеса и торфяной залежи с представлением их контактной поверхности как двояковогнутой фигуры (части эллипсоида) и упрощенным расчетом площади контактной поверхности деформированных элементов представлено в работе [7]. Однако вопрос о несущей способности торфяной залежи под пневматическим колесом остался за границей исследования. В то же время это вопрос очень важный.

М.М. Танклевский рекомендует следующие значения среднего допускаемого давления для колесных опор на торфяной залежи: при осушении и подготовке залежи к эксплуата-

ции – 23 кПа; при производстве фрезерного торфа – 38 кПа; при производстве кускового торфа – 48 кПа [4]. Данные, на наш взгляд, весьма спорные. Но это на сегодняшний день – единственная информация, которой необходимо следовать непререкаемо, ведь нет для торфяников ничего выше, чем «Справочник по торфу»! В то же время в работе [8] приводится число 60 кПа, что обосновано экспериментальными работами, проведенными на полях производства фрезерного торфа концерна «Белтопгаз». Данные отличаются весьма значительно. В таком случае возникает вопрос, чем же отличаются схемы взаимодействия гусеничного хода и пневматических колес с торфяной залежью?

Рассмотрим рис. 10. Здесь схематично представлены в профиль гусеница и пневматическое колесо.

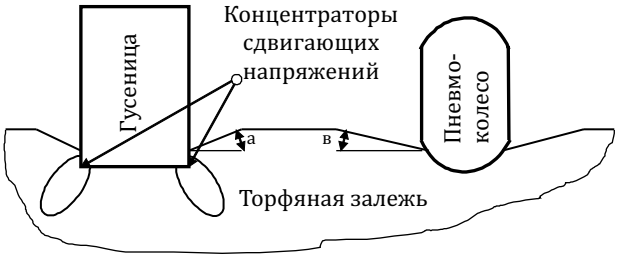


Рис. 10. Схемы взаимодействия гусеницы и пневматического колеса с торфяной залежью

Fig. 10. Schemes of interaction tracks and pneumatic wheels with peat deposit

Гусеничный ход имеет явно выраженные концентраторы сдвигающих напряжений, сосредоточенные по углам контакта. Поверхностные слои залежи легко прорываются в этих местах, происходит срез, и гусеница погружается в залежь. Пневмоколесный ход острых углов не имеет, как не имеет и явно выраженных концентраторов сдвигающих напряжений. Поэтому верхние слои залежи в большей степени прогибаются и натягиваются под колесом, чем под гусеницей; $\alpha > \beta$. Кроме того, подсчет площадей контактных поверхностей для пневмоколес, проведенный в работе [7] показал, что для условий добычи фрезерного и кускового торфа они составляют менее 0,25 м^2, т. е. в зоне интенсивного роста несущей способности залежи (см. рис. 7 и 9). Последние два обстоятельства дают право предположить, что несущая способность торфяной залежи под пневматическими колесами выше, чем под гусеницами. Об этом же писал Ф.А. Опейко в 1960 году [9]. Приведем его данные о допускаемом давлении для различных видов залежей (табл.) с небольшими видоизменениями.

Таблица

Допускаемые удельные давления для торфяной залежи

Table

????

№ п/п	Тип и состояние торфяной залежи	Допускаемое удельное давление, кПа
1	Верховая неосушенная залежь	10
2	Низинная неосушенная залежь	15
3	Верховая осушенная залежь	20–25
4	Низинная осушенная залежь	25–30
5	Давно осушенная, консолидированная залежь	35–60
6	Давно осушенная, консолидированная залежь в сухую погоду	60–100

Анализируя данные таблицы, Ф.А. Опейко пишет: «Для ходовых колес, имеющих незначительные опорные площади, следует числовые значения давлений, приведенных в таблице, увеличивать в 2–3 раза, так как они лучше всего подходят для опорных площадей гусеничных машин». И действительно, если иметь в виду, что зависимость (5) была получена для жестких плоских штампов, то ее применимость к пневмоколесному ходу должна сопрягаться, по крайней мере, с изменением коэффициентов A и B. А для того чтобы не было такого разброса в значении (в 2–3 раза), следует иметь в виду то обстоятельство, что под ходовыми колесами Ф.А. Опейко понимал прежде всего жесткий, недеформируемый колесный ход, так как пневматический в те годы был еще в диковинку. Поэтому можно полагать, что коэффициент увеличения данных, содержащихся в таблице 1, с учетом запаса, должен быть не менее 2,5.

Идут годы, крепнет и развивается торфяная наука. Но для адекватного описания несущей способности торфяной залежи под пневматическими колесами необходимы широкие испытания и исследования. С гусеничным ходом все несколько проще. Приняв параметры гусеничного хода трактора ДТ-75 как типовые, широкораспространенные, С.С. Корчунов с соавторами проводил «штамповые» испытания, используя этот передвигающийся по полю трактор в качестве штампа. С колесным

ходом такое упрощение вряд ли возможно, так как многочисленные типы и размеры применяющихся в настоящее время колес в торфяной отрасли не позволяют выделить какой-то наиболее широко распространенный вид. Поэтому реальная зависимость несущей способности от параметров штампа и состояния торфяной залежи может быть найдена путем проведения многочисленных испытаний со штампами, напоминающими форму деформированного колеса, например сферическими или эллипсоидными.

Библиографический список

1. *Бабков, В.Ф., Безрук, В.М.* Основы грунтоведения и механики грунтов: учеб. для вузов. – М.: Высшая школа, 1976. – 328 с.
2. *Цытович, Н.А.* Механика грунтов: учеб. для вузов. – 3-е изд., доп. – М.: Высшая школа, 1979. – 272 с.
3. *Винокуров, В.П., Тетеркин, А.Е., Питерман, М.А.* Строительные свойства торфяных грунтов. – Минск: изд-во Академии наук БССР, 1962. – 284 с.
4. *Справочник* по торфу / И.Ф. Ларгин, С.С. Корчунов, Л.М. Малков и др. Под ред. А.В. Лазарева и С.С. Корчунова. – М.: Недра, 1982. – 760 с.
5. *Амарян, Л.С.* Прочность и деформируемость торфяных грунтов. – М.: Недра, 1969. – 192 с.
6. *Синицын, В.Ф., Сапрыкина, С.В.* Дифференцированные значения коэффициента упругости торфяной залежи // Машины и технология торфяного производства. – Калинин: КГУ, 1988. – С. 91–93.
7. *Яблонев, А.Л.* Пневматический колесный ход и особенности его взаимодействия с торфяной залежью: монография. Тверь: ТГТУ, 2011. – 168 с.
8. *Казаченко, Г.В., Басалай, Г.А., Слесарчик, П.Ф.* Опыт и перспективные направления использования колесных машинно-тракторных агрегатов на добыче торфа // Торф и бизнес. – 2006. – № 1 (3). – С 21–24.
9. *Опейко, Ф.А.* Колесный и гусеничный ход. – Минск: Изд-во Академии с.-х. наук БССР, 1960. – 228 с.

УДК 662.331(09)

Копенкина Л.В.

Копенкина Любовь Владимировна, к. т. н., доцент кафедры торфяных машин и оборудования Тверского государственного технического университета (ТвГТУ). Тверь, Академическая, 12. lvkopenkina@mail.ru

В.Е. РАКОВСКИЙ (1900–1988) – ОСНОВАТЕЛЬ НАУЧНОЙ ШКОЛЫ ХИМИЧЕСКОЙ ТЕХНОЛОГИИ ТОРФА (к 115-летию со дня рождения)

Аннотация. В статье представлены биографические данные выдающегося деятеля торфяного дела профессора Владимира Евгеньевича Раковского (1900–1988), показан его вклад в развитие научных исследований в области химической технологии торфа, создание энергохимических производств на основе торфа в СССР, подготовку специалистов в области химии и химической технологии торфа.

Ключевые слова: химическая технология торфа, Раковский В.Е. , история торфяного дела.

Kopenkina L.V.

Kopenkina Lubov V., Dr., Associate Professor of the Chair of Peat Machinery and Equipment of the Tver State Technical University. Tver, Akademicheskaya,12

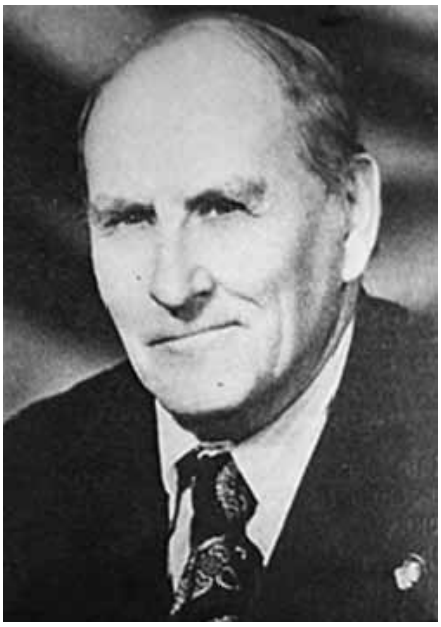
V.E. RAKOVSKIY (1900–1988) – THE FOUNDER OF SCIENCE SCHOOL OF PEAT CHEMICAL TECHNOLOGY (to the 115 anniversary since birth)

Abstract. The article presents the biographical data of the outstanding figure of the peat science the Professor Vladimir E. Rakovsky (1900–1988), shows its contribution to the development of research in the field of peat chemical technology, creation peat energy and chemical industry in the USSR, the training of specialists in the field of peat chemistry and peat chemical technology.

Key words: pressure, technology of peat chemical technology, Rakovskiy V.E., history of the peat.

В 2015 году исполняется 115 лет со дня рождения Владимира Евгеньевича Раковского, профессора Московского торфяного института, члена-корреспондента АН БССР, одного из основателя отечественной научной школы химической технологии торфа.

Раковский родился 5 декабря 1900 года в семье студента в Москве. Позднее его отец, известный профессор Евгений Владимирович Раковский (1877–1948), работал в Московском химико-технологическом институте (МХТИ) имени Д.И. Менделеева. Он является одним из авторов первого советского учебника по химической технологии топлива (1939), впоследствии переизданном [1].



В.Е. Раковский

В 1918 году Владимир Раковский окончил гимназию, в 1924 году – естественное отделение физико-математического факультета МГУ по специальности физико-химия (архив ТвГТУ). В 1921–1923 гг. учился в Ташкентском университете (в связи с переездом семьи), одновременно был ассистентом на кафедре органической химии, которой руководил профессор С.Н. Наумов. Первые научные работы по изучению озер Московской области Раковский выполнил еще в студенческие годы в 1919 году. Начал преподавать на торфяном факультете Горной академии и в Московском торфяном институте.

В 1923–1926 гг. он работал младшим научным сотрудником в научно-исследовательской химической лаборатории гидроторфа в Москве, которая в апреле 1926 года была объединена с Инсторфом. В Инсторфе Раковский работал старшим научным сотрудником, заведующим лабораторией химической переработки смол в 1926–1938 гг. Его первые опубликованные научные работы были выполнены под руководством профессора Стадникова в Инсторфе [2, 3]. В 1928 году им были написаны статьи о получении высокоактивных углей из торфа [4], промышленной ценности торфяного дегтя и способах его получения [5].

В 1930 году им был получен патент № 15315 (заявлен в 1927 году, соавторы – Виноградов А.А., Мэль П.К.) на способ обесцвечивания фенола, крезолов и других кислых фракций смол, находящих применение в чистом и бесцветном виде в различных отраслях промышленности. Торф использовался как вещество, содержащее гуминовые вещества, которые применялись при обесцвечивании.

В 1930 году Раковский был командирован в Германию и Швецию для изучения постановки научной работы по переработке топлива [6], по результатам был написан отчет об исследовании способов переработки торфяного дегтя (1930).

Под руководством В.Е. Раковского в лаборатории Инсторфа в 1930-е годы был создан ряд новых технологических процессов и аппаратов химической переработки торфа для производства полукокса, газа, моторного топлива, восков, аммиака, уксусной кислоты и др.

В эти годы им получены патенты на изобретения способа переработки дегтя, полученного при коксовании при низких температурах торфа (№ 19713, 1931); способа выделения фенолов из дегтя (№ 27892, 1932); авторское свидетельство на изобретение торфококсовальной печи для получения металлургического кокса (№ 35816, 1934), способа использования посмольных вод, получаемых при газификации и коксовании торфа (№ 46575, 1936). Об итогах 10-летней работы коллектива химической лаборатории Инсторфа сообщалось в публикациях Раковского в 1937 году [7–8].

В 1938 году Раковским была дана характеристика существующих торфяных дегтей для получения пека, способы его производства и описание перегонных систем [9]. Результаты научных работ ученого в области термической переработки торфа были реализованы при создании газогенераторных станций на торфе, которые сыграли большую роль в становлении отечественной промышленности в предвоенное время (1934–1938 гг.).

В 1941 году он подал заявку на изобретение способа извлечения воска из торфяного дегтя.

В 1938–1941 годах В.Е. Раковский являлся заместителем директора по научной работе Инсторфа, объединенного в 1941 году со Всесоюзным научно-исследовательским институтом торфяной промышленности (ВНИИТП). Общим собранием действительных членов и членов-корреспондентов Академии наук БССР за работы в области химии и химической технологии торфа он был избран членом-корреспондентом АН БССР 11 апреля 1940 года.

В 1941–1943 гг. Раковский был научным руководителем сектора переработки Всесоюзного научно-исследовательского института торфяной промышленности. В ноябре 1942 года Раковский сообщал о результатах научной работы ученых восстановленного Института торфа, работавшего в военный период на базе Московского химико-технологического института имени Д.И. Менделеева, на сессии Академии наук БССР в г. Ташкенте.

Как член-корреспондент АН БССР, по поручению Президиума Академии наук Раковский был избран директором Института торфа АН БССР с 5 декабря 1942 года (архив ТвГТУ). К концу 1943 года было организовано Отделение технических наук, объединившее в своем составе Институт торфа АН БССР и ряд лабораторий: физико-химии коллоидов, кинетики и катализа, технической физики.

В годы Великой Отечественной войны коллектив Института торфа, возглавляемый Раковским, выполнял исследования, связанные с энергохимическим использованием торфа. Он был награжден медалью «За доблестный труд в Великой Отечественной войне».

Его научные работы способствовали созданию принципиально новой промышленности – комплексному энергохимическому использованию торфа, имевшему большое народнохозяйственное значение. С использованием этих исследований коксование, газификация и переработка смолы были освоены в промышленных условиях.

В 1947 году Раковский отмечал, что торфогазовая промышленность в стране должна быть усовершенствована путем перехода на газификацию более мелкого торфа, так как это позволит вдвое увеличить выходы смол; торфяная залежь должна быть дифференцированно использована для увеличения выхода наиболее ценных продуктов [10].

В 1947 году В.Е. Раковский защитил докторскую диссертацию «Химия и технология первичных дегтей торфа», представленную в форме монографии. Ученая степень доктора технических наук была присуждена в 1948 году.

В эти годы Раковский руководил научными работами по темам «Снижение намокания фрезерного торфа при хранении» [11], «Исследование взрываемости торфяной пыли» (1949), «Подбор торфов для изготовления упаковочного материала в целях предохранения плодов и овощей от порчи» (1951), «Комплексная переработка торфа путем газификации под давлением» (1952).

В 1950 году Раковский В.Е. и Горячкин В.Г. получили авторское свидетельство № 73645 на способ гидроизоляции штабелей торфа методом битуминозного покрытия, нанося на поверхность штабеля торфа битуминозную пыль, эмульсии или жидкости, изготовленные из мазутов, битумов, смолы, нефти или продуктов их переработки, в том числе отходов производства, что позволяло делать поверхность несмачиваемой.

В.Е. Раковский работал директором Института торфа АН БССР до августа 1950 года. Он был освобожден от этой должности по собственному желанию (архив ТвГТУ). С 1952 года ученый был назначен научным руководителем лаборатории химии и химической технологии торфа этого же института. В 1950-х годах под руководством Раковского были проведены новые исследования по химии и генезису торфа, о результатах которых сообщалось на конференции по химии и генезису топлива АН БССР, в трудах Института торфа АН БССР.

При изучении химического состава торфа установлены закономерности изменения содержания компонентов от ботанического состава, степени разложения, условий залегания и других факторов. Полученные данные позволили Раковскому с сотрудниками лаборатории сформулировать новые теоретические положения о происхождении твердых топлив, сущность которых сводилась к циклизации углеродных атомов, протекающей в торфе в результате реакций дегидратации и декарбоксилирования.

Впервые было показано, что накопление органического вещества происходит не только за счет анаэробных условий и более медленного окисления химических и биохимических стабильных веществ, но и за счет консервации

всей массы органического материала благодаря наличию в растениях антисептиков-фенолов. Последние не только сохраняют растения при жизни, но и консервируют их после отмирания. Этот процесс получил название «пассивного химического иммунитета».

В это время наряду с работами по совершенствованию технологии и механизации добычи торфа проводились исследования по выделению ценных химических продуктов при нетопливном использовании торфа. Выполнен комплекс работ по энергохимической переработке торфа.

В результате исследований состава и механизма образования летучих продуктов термического распада торфа разработана промышленная схема переработки торфяного дегтя с получением антисептиков, гербицидов, дубителей и других веществ.

Для расширения сырьевых ресурсов по производству металлургического кокса выполнены исследования по получению прочного кокса при совместной переработке торфа и нефтепродуктов.

В 1954 году Раковский вместе с С.С. Маль подали заявку на изобретение способа переработки торфяной подсмольной воды (авторское свидетельство №102306). Технологическая схема переработки подсмольной воды позволяла решить вопрос очистки и обезвреживания подсмольных вод, образующихся при работе торфяных газогенераторных станций, что являлось узким местом в их работе и сдерживало дальнейшее развитие производства газа из кускового торфа.

В 1959 году Раковским была подана заявка на изобретение способа скоростного облагораживания торфа с целью снижения стоимости высококалорийного топлива, в 1961 году – на способ производства древесно-стружечных плит с применением гумусового торфа как связующего для уменьшения их стоимости.

Раковский дал химико-технологическую оценку торфа как сырья для химической переработки. Он разработал теорию спекания и коксообразования твердых топлив. Ученый создал новые технологические процессы по производству торфяного полукокса, переработки торфяного дегтя и получения торфяных фенолов, по производству прочного кокса при совместной переработке торфа и нефти, а также по созданию углеродных адсорбентов на основе торфа и продуктов его переработки.

Под его руководством разработана принципиальная схема использования торфа и летучих продуктов термической деструкции для прямого восстановления железных руд. Отдельные разработки по термической переработке торфа Раковского были реализованы при строительстве газогенераторных станций и в установках по переработке дегтя.

Исследования Раковского по химии полисахаридов торфа позволили создать ряд технологических процессов получения белково-углеводных кормов из торфа.

Многолетнее изучение теоретических вопросов генезиса горючих ископаемых, химического состава торфов и растений-торфообразователей, выяснение влияния времени, физических и химических факторов привели Раковского к созданию общей теории происхождения гумусовых топлив и описанию механизма процессов углефикации растительного материала.

С 1944 года Раковский работал заведующим кафедрой общей химической технологии (позднее – кафедры химической технологии торфа) Московского торфяного института (МТИ) по совместительству. Профессор по кафедре химической технологии торфа Московского торфяного института с 1951 года.

В.Е. Раковский (крайний справа) с академиком И.И. Лиштваном, директором Института торфа АН БССР, и членом-корреспондентом П.И. Белькевичем (середина 1980-х годов) [17].

С конца 1940-х годов кафедра химической технологии торфа стала выпускать кадры по специализации «Химическая переработка торфа». В учебные планы подготовки инженеров по разработке торфяных месторождений был введен курс химии торфа, разработанный Раковским. Кафедра химической технологии

торфа имела хорошо оборудованную лабораторию, поэтому лабораторные работы имели научно-исследовательский характер. На базе в основном этой кафедры был создан химико-технологический факультет Московского торфяного института.

В этот период в нашей стране работало более 300 газогенераторных станций, снабжавших газом стекольные заводы и др. На Клинском стекольном заводе под руководством Раковского выполнялись исследования установки высококалорийного газа из торфа и дров с присадкой мазута и торфяной смолы (1952), повышения производительности газостанции (1955).

До 1959 года Раковский руководил кафедрой химической технологии торфа в Московском торфяном институте.

В 1959 году ученым была организована лаборатория по комплексной переработке торфа в Калининском торфяном институте. Под руководством Раковского велась научная работа по темам «Изучение возможности использования продуктов переработки торфа в качестве удобрений и стимуляторов роста» (1960), «Изучение механизма коксообразования в паровой фазе» (1960), «Изучение процесса конденсации фенолов в феноломасляных средах» (1960), «Изучение процессов термического распада твердых топлив» (1963), «Использование углеводной части торфа с последующей переработкой остатка» (1963), «Изучение химических и биохимических свойств торфа и разработка рекомендаций по его использованию в народном хозяйстве» (1964), «Изучение процесса саморазогревания фрезерного торфа» (1967).

После 1968 года проблемную лабораторию по исследованию свойств, переработки и комплексному использованию торфа в народном хозяйстве Калининского политехнического института возглавил Иван Иванович Лиштван.

В 1960–1963 гг. В.Е. Раковский вновь возглавлял Институт торфа АН БССР [12].

В 1964–1968 гг. Раковский был избран заведующим кафедрой химической технологии твердого топлива в Калининском политехническом институте.

В 1970–1979 гг. Раковский руководил лабораторией химии торфа Московского филиала ВНИИТП.

В 1966 году Раковским и сотрудниками Института торфа было получено авторское свидетельство (№ 178797) на способ получения активного угля из торфа.

В 1980 году им вместе с сотрудниками Калининского филиала ВНИИТП было получено авторское свидетельство (№ 763309) на способ получения стимулирующих удобрений путем смешивания торфа с минеральными компонентами.

В.Е. Раковский входил в состав бюро научного совета АН СССР по ископаемому твердому топливу, диссертационных советов, научных советов по проблемам использования торфа и продуктов его переработки, редколлегии журчала «Химия твердого топлива».

Раковский В.Е. – автор более 300 научных статей, 4 монографий [13–16], около 50 патентов и авторских свидетельств на изобретения. Раковский подготовил более 40 кандидатов и одного доктора наук. Научные работы ученого получили широкое признание среди отечественных и зарубежных специалистов в области химической технологии торфа.

14–18 сентября в г. Владимире проводилась Всероссийская с международным участием девятая школа молодых ученых «Болота и биосфера», организуемая ежегодно доктором сельскохозяйственных наук, членом-корреспондентом РАН, профессором Томского государственного педагогического университета Лидией Ивановной Инишевой. В этом году научная школа была посвящена 115-летию со дня рождения В.Е. Раковского. Роль ученого как основоположника химической технологии торфа подчеркивалась в докладах участников научной школы.

Библиографический список

1. *Кропотов, К.Н.* Общая химическая технология топлива: учебник для химико-технологических вузов / К.Н. Кропотов, Е.В. Раковский [и др.]. – Л., 1941, М.-Л., 1947.
2. *Раковский, В.Е.* Окисление масел из торфяного дегтя / В.Е. Раковский, Г.Л. Стадников // Труды Инсторфа, вып. 1, 1928. – С. 28–29.
3. *Раковский, В.Е.* Определение асфальтенов в торфяных дегтях / В.Е. Раковский, Г.Л. Стадников // Труды Инсторфа, вып. 1, 1928. – С. 26–27.
4. *Раковский, В.Е.* Торф как лучший материал для изготовления высокоактивных углей // Труды Инсторфа, вып. 1, 1928. – С. 52–57.
5. *Раковский, В.Е.* К вопросу о промышленной ценности торфяного дегтя и о принципах

его переработки // Торфяное дело, № 2, 1929. – С. 47–49.
6. *Раковский, В.Е.* Использование в СССР западноевропейского опыта утилизации побочных продуктов коксования и газификации // Торфяное дело, № 4–5, 1931. – С. 49–59.
7. *Раковский, В.Е.* Развитие технологии энергохимического использования торфа за 10 лет и ее первоочередные задачи // За торфяную индустрию, 1937. – № 1. – С. 17–22.
8. *Раковский, В.Е.* Энергохимическое использование торфа в третьем пятилетии // За торфяную индустрию, 1937. – № 5–6. – С. 38–39.
9. *Раковский, В.Е.* Пек первичных торфяных дегтей // За торфяную индустрию, 1938. – № 7. – С. 26–36.
10. *Раковский, В.Е.* Химическая переработка торфа // Торфяная промышленность, 1947. – № 2. – С. 40–42.
11. *Горячкин, В.Г.* Основы технологии торфяного производства. – М.: Госэнергоизат, 1953. – 200 с.
12. *Институт* торфа АН БССР. – Мн.: Наука и техника, 1983. – 160 с.
13. *Раковский, В.Е.* Химия и технология первичных дегтей торфа. – Минск: Изд. АН БССР, 1949. – 236 с.
14. *Раковский, В.Е.* Общая химическая технология торфа. – М.-Л.: Госэнергоиздат, 1949. – 363 с.
15. *Раковский, В.Е.* Химия пирогенных процессов / В.Е. Раковский, Ф.Л. Каганович, Е.А. Новичкова. – Минск: АН БССР, 1959. – 208 с.
16. *Раковский, В.Е.* Химия и генезис торфа / В.Е. Раковский, Л.В. Пигулевская; под ред. А.В. Лазарева. – М.: Недра, 1978. – 231 с.
17. *Иван* Иванович Лиштван: к 80-летию со дня рождения/Сост. Р.В. Ахремчик [и др.]. – Минск: Беларус. Навука, 2012. – 279 с.