ведущим механизмом теплового сопротивления остается характерное для стекол резонансное рассеяние фононов на двухуровневых системах $\gamma_m(x)$. При этом помимо аномалии на кривой λ(Т) около T_C в расчете может появиться максимум (рис. 2) при температуре порядка 250 °К. Поэтому представляли бы значительный интерес экспериментальные данные по теплопроводности λ(T), теплоемкости $C(T)$ и КТР α(T) ЦТС в более широкой области температур (50 – 1000 °К).

Согласно [8] отрицательная область значений коэффициента теплового расширения (КТР) в твердых телах может иметь весьма разную природу и разную форму, например, как в ПКР-7М [1], [2]. Это обстоятельство интерпретируется исходя из самых разных подходов [8]. В нашей модели при $\omega_0^2(T) < \delta^2$ имеем мнимые значения мягкой моды $-\delta^2 \le \omega_M^2(T) \le 0$ ($\omega_M(T) \cong i\delta$), что соответствует согласно [8] отрицательным значениям КТР с $\delta_0 = -3\cdot10^{-6}$ (1/К) в области $T_1 \le T \le T_2$.

Остается неясным наблюдаемое слишком резкое возрастание α(T) справа от T_C ($A_0 = (1{,}602/1{,}38)\cdot10^{-7}$, при $T < T_C$ и $A_0 = (1{,}602/1{,}38)\cdot10^{-4}$ (1/мэВ), при $T \ge T_C$, рис. 2). Отметим, что еще более значительное возрастание α(T) при $T \ge T_C$ наблюдается для ряда систем, в том числе в кристаллах триглицинсульфата (ТГС) [9]. Несмотря на это, предложенные нами в работе модели для λ(T) и для α(T) с единых позиций мягкой моды хорошо качественно объясняют температурное поведение коэффициентов теплопроводности и теплового расширения ЦТС и результаты расчетов количественно согласуются с данными опытов.

Литература

1. *Аксенов, В.Л.* Рассеяние нейтронов сегнетоэлектриками / В.Л. Аксенов, Н.М. Плакида, С. Стаменкович. – М., 1984.

2. *Алтухов, В.И.* Основы теории кинетических свойств кристаллов с дефектами и фазовыми переходами: диэлектрики и сегнетоэлектрики / В.И. Алтухов. – Ставрополь, 2003.

3. *Алтухов, В.И.* Модели особенностей теплового сопротивления кристаллов с фазовыми переходами и дефектами / В.И. Алтухов, Б.А. Казаров, Н.В. Баландина // Изв. Самар. НЦ РАН. – 2007. – № 3. – С. 640 – 646.

4. *Алтухов, В.И.* Рассеяние фононов на точесных дефектах структуры, комплексах-наночастицах и типичные особенности теплового сопротивления реальных кристаллов и сегнетоэлектриков / В.И. Алтухов, А.Т. Ростова, Б.А. Казаров // Нано- и микросистемная техника. – 2006. – № 3. – С. 19 – 25 (I ч.); № 4. – С. 14 – 20 (II ч.).

5. *Каллаев, С.Н.* Особенности теплопроводности и теплового расширения сегнетокерамики на основе ЦТС / [С.Н. Каллаев и др.] // Материалы международной конференции «Fizika-2005». – Баку, 2005. – С. 333 – 335.

6. *Каллаев, С.Н.* Теплофизические свойства сегнетокерамики на основе ЦТС / [С.Н. Каллаев и др.] // Физика твердого тела. – 2006. – Т. 48. – Вып. 6. – С. 1099 – 1100.

7. *Могилевский, Б.М.* Теплопроводность полупроводников / Б.М. Могилевский, А.В. Чудновский. – М., 1972.

8. *Новикова, С.И.* Тепловое расширение твердых тел / С.И. Новикова. – М., 1974.

9. *Струков, Б.А.* Физические основы сегнетоэлектрических явлений в кристаллах / Б.А. Струков, А.П. Леванюк. – М., 1995.

10. *Ферми, Э.* Молекулы и кристаллы / Э. Ферми. – М., 1947.

11. *Френкель, Я.И.* Введение в теорию металлов / Я.И. Френкель. – М. ; Л., 1950.

12. *Jnoue M., J.* Phys. Soc. / M., J. Jnoue. – 1968. – Jpn. 25.

13. *Levanyuk, A.P.* Defects and structural phase transitions / A.P. Levanyuk, A.S. Sigov // OPA. – Amsterdam, 1988.

14. *Mante A.J., J.* Volger Phys. Lett. / A.J., J. Mante. – 1967. – A24.

15. *Steigmeier, E.F.* Phys.Rev.168 / E.F. Steigmeier. – 1968.

16. *Strukov, B.A.* Heat transport properties of ferroelectrics and related materials / B.A. Strukov, A.A. Belov // Phase Transitions. – 1994. – V. 51. – P. 175 – 197.

17. *Strukov, B.A.* Study phonon scattering in displacive ferroelectrics by means of heat conductivity measurements / B.A. Strukov, A.A. Belov, V.I. Altukhov // Ferroelectrics. – 1994. – V. 159. – P. 25 – 30.

УДК 662.641

П.В. Малыгин, В.К. Любов

ИССЛЕДОВАНИЕ СТРУКТУРЫ, СОСТАВА И СВОЙСТВ ТОРФА

В статье рассмотрен вопрос использования торфа как перспективного вида топлива для выработки тепловой и электрической энергии на территории Северо-Западного региона. Приведены данные по запасам торфа в месторождениях Архангельской области, а также результаты исследования теплотехнических характеристик для некоторых из них. Проанализированы результаты элементного анализа торфа и торфяных брикетов, дифрактометрических исследований, а также данные микрофотографии, полученные на электронном микроскопе.

Торф, топливный брикет, элементный состав, теплотворная способность, кристалличность, электронная микроскопия.

The article considers the use of peat as a promising type of fuel for heat and power in the North-West region. The data on stocks of peat deposits of the Arkhangelsk region as well as the results of studying the thermal characteristics of some of them are presented. The results of elemental analysis of peat and peat briquettes, diffractometric research as well as microphotograph data obtained by an electron microscope have been analyzed.

Peat, peat briquette, ultimate composition, caloric value, crystallinity, electron microscopy.

В последнее время наблюдается большой интерес к использованию местных видов энергетических ресурсов. Этот факт обусловлен многими причинами, главными из которых являются: политика государства, нацеленная на рациональное использование природных богатств страны, и стремление к энергетической независимости регионов от привозных и, как правило, дорогостоящих видов топлив. По данным «Концепции охраны и рационального использования торфяных болот России» наибольшее количество запасов торфа категорий $A+B+C_1$ – 6,9 млрд т (36,2 % от запасов России) разведано в Северо-Западном федеральном округе при существующей степени заторфованности 5 – 10 %. В то же время общее количество месторождений в данном регионе составляет 18912, а прогнозируемые ресурсы торфа 16,2 млрд т [1]. Приведенные данные позволяют сделать вывод о потенциале возможного использования запасов данного энергетического ресурса для обеспечения генерации теплоты и электроэнергии. Важно отметить, что не все месторождения могут быть использованы на данном этапе развития экономики. Поэтому проблема выбора оптимальных и наиболее эффективных торфяных ресурсов стоит очень остро. Оценка производится по многим параметрам, среди которых теплофизические, гранулометрические, морфологические и другие свойства топлив. Большое значение также имеет экономическая составляющая вопроса, поскольку часть ресурсов находится на труднодоступных территориях либо в малонаселенных пунктах, где отсутствует потребность в больших объемах выработки тепловой и электрической энергии. Добыча и использование торфа в таких регионах возможны только при осуществлении дотационной политики и поддержки со стороны государства.

Торф представляет собой наиболее молодое в геологическом отношении ископаемое твердое топливо. Первые процессы торфообразования связаны с каменноугольным периодом, который характеризуется появлением и пышным расцветом растительного мира. Современные торфяные месторождения возникли в постледниковое время на территории, освобожденной отступавшим ледником. Вплоть до наших дней происходит образование новых торфяников: заторфовывание водоемов и заболачивание суходольных площадей [5].

Данный вид топлива занимает промежуточное место между возобновляемыми и невозобновляемыми источниками энергии. Он относится к медленно возобновляющимся топливам, так как период его восстановления на месте добычи превышает 200 лет. Однако потребление торфа в РФ намного отстает от его ежегодного естественного прироста, что позволяет в данных условиях рассматривать торф как возобновляемый источник энергии [3]. В качестве топлива могут использоваться верховые, переходные и низинные залежи торфа. Выделяющиеся при сжигании данного топлива газы относятся к парниковым, однако их количество и степень опасности напрямую зависят от технологии сжигания и месторождения, на котором добывается этот ресурс.

Торф – это отложения органического происхождения, состоящие из остатков болотных растений (лиственных и хвойных деревьев, кустарников, трав, мхов), подвергшихся неполному разложению при недостаточном доступе воздуха. Кроме большого разнообразия весьма ценных органических компонентов, в торфе содержатся также и различные неорганические соединения.

Основу торфа составляют растительные остатки твердых полимеров целлюлозной природы и продукты их распада, находящиеся в равновесии с водным раствором низко- и высокомолекулярных веществ. Неорганическая часть представлена в торфе нерастворимыми минералами разной природы, адсорбционными образованиями минералов с гуминовыми веществами, неорганическими компонентами торфяной воды, ионообменными гетерополярными органоминеральными комплексами и комплексно-гетерополярными производными [2].

Архангельская область обладает самыми большими запасами торфа среди регионов, расположенных на европейской части России. Разведанные и предварительно оцененные запасы торфа составляют около 4 млрд т, прогнозируемые ресурсы определяются еще примерно в 8 млрд т. Залежи торфа по районам области распределены неравномерно [3] (табл. 1), при этом на 17 наиболее крупных месторождений приходится 28 % от всех запасов торфа.

Для проведения экспериментов были выбраны: низинный торф из Кенозерского месторождения фракция размером 63 – 125 мкм и топливный торфяной брикет. Отобранные пробы были подготовлены согласно предъявляемым требованиям. Исследования проводились по нескольким направлениям с целью комплексной оценки образцов как топливно-энергетического ресурса. Работа выполнялась с использованием оборудования ЦКП НО «Арктика» Северного (Арктического) федерального университета им. М.В. Ломоносова при частичной финансовой поддержке Минобрнауки РФ и Программы развития САФУ.

Определение элементного состава проводилось на автоматизированном анализаторе Euro EA-3000, представляющем новый стандарт анализа CHNS (углерода, водорода, азота и серы). Метод основан на высокотемпературном сжигании пробы в присутствии кислорода при температуре печи 980 °С с последующим газохроматографическим разделением и детектированием продуктов сгорания при помощи высокочувствительного катарометрического детектора, имеющего температуру 110 °С.

Таблица 1

Запасы торфа в месторождениях Архангельской области

Районы	Количество торфяных месторождений	Площадь в нулевой границе торфяного месторождения, га	Площадь в границе промышленной глубины торфяной залежи, га	Запас торфа при 40 % влажности, тыс. т
Вельский	92	30453	19581	58314
Верхнетоемский	45	91341	55448	175325
Вилегодский	32	16699	10281	27056
Виноградовский	68	75942	47806	172927
Каргопольский	151	184142	139878	533340
Коношский	119	46280	35995	161073
Котласский	55	36191	18174	56750
Красноборский	79	33355	19323	47871
Ленский	11	15538	10164	27193
Лешуконский	66	55823	32807	63413
Мезенский	121	287868	211469	500333
Няндомский	22	42925	33428	152651
Онежский	94	108191	86998	353528
Пинежский	87	71598	50328	173018
Плесецкий	109	132547	97295	349391
Приморский	112	147072	117838	420604
Устьянский	124	16974	10811	30711
Холмогорский	464	109048	70276	239944
Шенкурский	57	68601	47406	189590
НАО	18	5608	2974	6851
Всего	**1926**	**1576196**	**1118280**	**3739883**

Исследования выполнялись с целью сравнения содержания углерода и водорода в торфяном брикете и исходном сырье для его получения. Значения содержания углерода и водорода приведены в расчете на абсолютно сухую пробу (табл. 2).

Таблица 2

Результаты элементного анализа

Наименование пробы	Наименование показателей		
	C^d, %	H^d, %	Выход летучих (V^{daf}), %
Торф низинный Кенозерье (63 – 125 мкм)	45,57	6,70	73,29
Торфяной брикет	47,70	5,44	70,05

Исходя из данных, приведенных в таблице, можно сделать вывод, что в процессе производства топливных торфяных брикетов происходит незначительное (в приведенном образце на 2,13 %) процентное повышение содержания углерода в материале. Содержание водорода наоборот снижается на 1,26 % в указанном случае. Данные явления могут быть связаны с частичной потерей летучих веществ торфом в процессе сушки, а также его нагревом при брикетировании (табл. 2).

Торф – геологически молодое, слаборазложившееся топливо с большим содержанием летучих веществ (табл. 2, 3), что упрощает его сжигание. Вместе с тем большая и колеблющаяся в широких пределах влажность создает значительные трудности при его сжигании.

Запасы торфа в Архангельской области представлены верховыми, смешанными, переходными и низинными типами залежей, причем две трети их сосредоточены в верховых болотах. Зольность торфа колеблется по отдельным болотам в широких пределах и достигает иногда значительных величин: болото Блудное (табл. 3) и болото Чарус Холмогорского района. Браковочный предел зольности на сухую массу принято считать равным 23 % [4].

Исключительно важной характеристикой торфа как топлива является степень его разложения. Поступление в котельную слаборазложившегося торфа вызывает не только резкое изменение топочного процесса, но и значительно осложняет работу транспортирующих устройств и питателей. Это свойство наряду с влажностью и зольностью характеризует кусковой и фрезерный торф как топливо. Качество торфа во многом также зависит от его происхождения и характера образования.

Результаты экспериментальных исследований [3] показали, что низшая теплота сгорания на горючую массу исходного сырья и торфяных брикетов, произведенных из него, имеют близкие значения. Однако брикетирование торфа позволяет за счет значительного снижения влажности и повышения его плотности получить высококачественное топливо достаточно однородного гранулометрического состава, обеспечивающее возможность замещения невозобновляемых дорогостоящих топлив и частичного снижения экологического воздействия энергетики на окружающую среду.

Таблица 3

Теплотехнические характеристики торфа Шенкурского месторождения

№ образца	W_t^r, %	A^d/A^r, %	V^{daf}, %	pH солевой суспензии	Q_i^r / Q_i^{daf}, МДж/кг
Болото Ваймаганьское					
1	85	6,1/0,92	69,99	4,2	0,96/22,02
2	85	5,8/0,87	70,05	4,0	0,97/22,00
3	85	6,7/1,01	70,79	3,0	0,93/21,93
4	84	4,1/0,66	71,64	4,0	1,25/21,90
5	82	6,9/1,24	69,87	5,0	1,62/21,98
6	86	8,8/1,23	70,17	4,8	0,63/21,89
7	82	11,4/2,05	68,32	3,0	1,45/21,99
8	78	8,2/1,80	69,56	3,8	2,48/21,97
9	86	5,7/0,80	70,22	4,2	0,75/22,03
Болото Блудное					
1	82	20,7/3,73	68,59	4,6	0,94/21,05
2	82	26,8/4,82	71,25	4,6	0,73/21,20
3	84	18,7/2,99	70,90	4,8	0,63/21,06
4	85	17,4/2,61	69,33	4,8	0,49/21,23
Болото Чистое					
1	86	9,2/1,29	70,11	4,2	0,78/23,10
2	86	2,6/0,36	71,19	3,2	0,98/23,06
3	86	2,2/0,31	69,46	3,3	1,01/23,16
Болото Забегалка					
1	87	8,2/1,07	71,82	5,4	0,18/19,82
2	89	6,0/0,66	72,36	5,4	0/19,97
3	86	5,4/0,76	68,57	5,4	0,50/20,12
4	83	4,9/0,83	69,89	4,2	1,20/20,35
5	88	10,6/1,27	71,55	5,4	0/20,54

Для характеристики надмолекулярной структуры образцов был применен метод рентгеноструктурного анализа, основанный на дифракции рентгеновских лучей на трехмерной кристаллической решетке. Кристаллическая решетка – это регулярное трехмерное распределение атомов в пространстве, имеющее различную симметрию. Кристаллическая решетка в заданном направлении может рассматриваться как серия параллельных плоскостей, отстоящих друг от друга на расстоянии d. Любое кристаллическое вещество характеризуется определенным набором межплоскостных расстояний d с различными ориентациями плоскостей. Когда монохроматизированный рентгеновский луч с длиной волны λ падает на систему кристаллических плоскостей под углом θ, дифракция возникает, только если пути, проходимые лучами, отраженными от различных кристаллических плоскостей, различаются на целое число длин волн. Это явление описано законом Брэгга:

$$n\lambda = 2d \sin\theta.$$

При изменении угла θ условия закона Брэгга удовлетворяются поочередно для различных систем плоскостей в поликристаллическом материале, в результате чего на дифрактограмме исследуемого вещества последовательно, с изменением угла, появляются рентгеновские рефлексы – пики (линии дифрактограммы) с явным максимумом. Координаты и высота пиков характеризуют исследуемое вещество.

Образец 1831-S был проанализирован на рентгеновском дифрактометре Shimadzu XRD-7000 S в виде таблетки, полученной в результате прессования 0,3 г пробы в пресс-форме диаметром 25 мм с усилием 10 тс. Рентгеновская дифрактограмма пробы была записана в неотражающем держателе с вращением 30 об./мин. Оптическая схема гониометра: θ – 2θ, детектор сцинтилляционный с монохроматором. Параметры работы рентгеновской трубки: ускоряющее напряжение 50 кВ, ток 30 мА, материал мишени – Cu. Диапазон сканирования по углу 2θ от 10 до 70º, скорость сканирования 0,5 град./мин., шаг 0,02º. Для оценки кристалличности материала применялось программное обеспечение дифрактометра.

На дифрактограмме торфяного брикета видны остроконечные пики, полученные от кристаллических фаз, и нелинейный фон – от аморфной фазы (рис. 1). По положению пиков дифрактограммы произведена идентификация кристаллической фазы, присутствующей в образце. Для торфяного брикета наблюдаются рефлексы с максимумами в области углов 2θ 20,9 и 26,7º при интенсивности 6200 и 8200 CPS соответственно, характерные для отражения единственного присутствующего кристаллического компонента – кварца SiO_2. Идентификация элемента достигнута путем нахождения в базе данных PDF-2 (Powder Diffraction File™ PDF-2 Release 2010, International Centre for Diffraction Data) таких же рентгеновских пиков, как на дифрактограмме исследуемого образца. На дифрактограмме также видно, что основная часть образца – аморфная, сходна с аморфной целлюлозой.

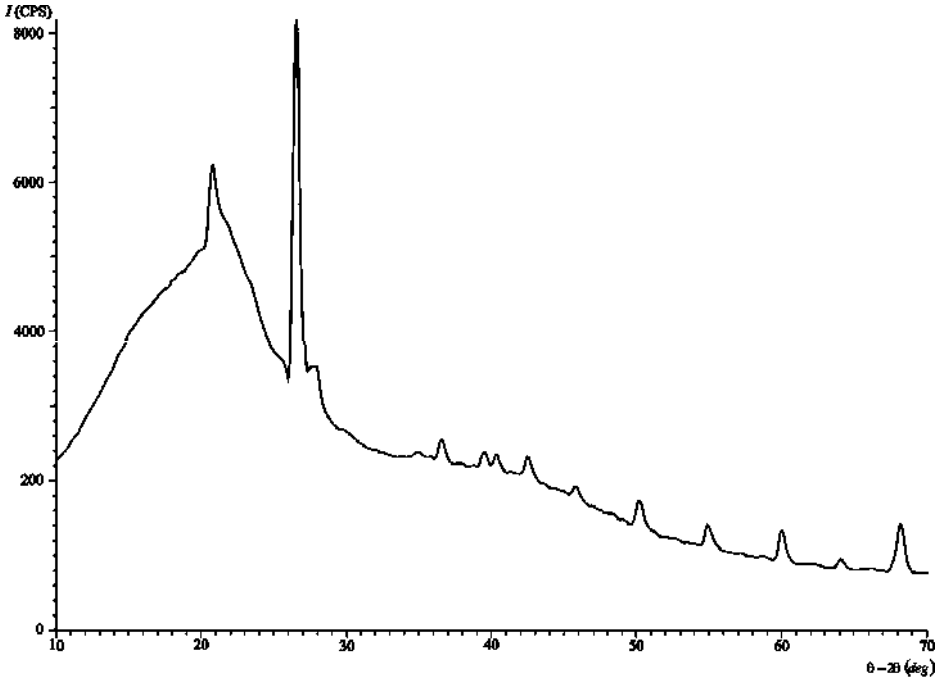


Рис. 1. Дифрактограмма торфяного брикета

Процесс брикетирования приводит к частичному нарушению кристаллической структуры торфа, однако степень кристалличности снижается значительно меньше, чем при гранулировании. Кристаллическим компонентом является вещество неорганической природы, что приводит к повышенной зольности торфа и вызывает определенные трудности при его сжигании.

Для изучения морфологии образцов были выполнены исследования на электронном растровом микроскопе Zeiss SIGMA VP. Характерной особенностью микроскопа SIGMA является использование технологии GEMINI – т.е. технологии, обеспечивающей высокое качество изображений и точные аналитические результаты среди всех автоэмиссионных микроскопов. GEMINI представляет собой электронно-оптическую колонну, способную обеспечивать изображение высокой четкости при низком значении рабочего напряжения и сверхстабильном токе пучка во время проведения аналитических испытаний. Исследования, проведенные с помощью электронного микроскопа, позволили подробно изучить структуру торфяного брикета.

В торфе следует различать макро- и микроструктуры. Из неразложившихся остатков растений-торфообразователей (древесных, травяных и моховых) образованы легкодеформируемые структуры. Степень их развития определяется глубиной биохимического распада торфообразователей. Ячейки структур переплетения заполняют микроструктуры торфа, формирующиеся из надмолекулярных образований продуктов распада, а также индивидуальных органических и минеральных соединений. Посредством сил различной природы эти соединения объединяются в ассоциаты (агрегаты), образуя внутри- и межагрегатные структуры различной компактности. Закономерности формирования таких структур определяются ботаническим составом, степенью разложения торфа, условиями торфообразования и химическим составом среды. Чаще эти рыхлые образования состоят из хаотически расположенных молекул, микрообъемы между которыми заполнены сорбированной водой и иммобилизованным раствором низко- и высокомолекулярных соединений [2].

В пределах ассоциатов существуют волокна, обрывки растительных тканей разной дисперсности, битумные частицы, продукты распада и минеральные включения (рис. 2а). Все эти компоненты образуют гамму нестабильных комплексов, компактность которых определяется природой торфа, энергией и характером межмолекулярных сил. Основу последних составляют взаимодействия между активными функциональными группами (COOH, OH и др.) посредством водородных связей через ионы и молекулы среды, а также за счет химических и других связей и сил. Поэтому к торфяным системам применимо правило динамического дисперсионного равновесия.

Гидрофильность торфа обусловлена наличием в его структуре компонентов активных функциональных групп (COOH, OH и др.), способных удерживать молекулы воды за счет водородных связей. Гидрофобные составляющие торфа, в основном битумы, термодинамически и агрегативно неустойчивы и сосуществуют с другими компонентами торфа. Наличие в торфе гидрофильных полуколлоидов, стабилизированных гидрофобных включений, а также растворов и дисперсий высокомолекулярных соединений придает ему специфические свойства, отличающие его от типичных коллоидных гетерогенных систем.

При изучении торфяных брикетов большое значение имеет структура поверхностного слоя, который должен обладать повышенными влагоустойчивыми свойствами по сравнению с остальной частью.

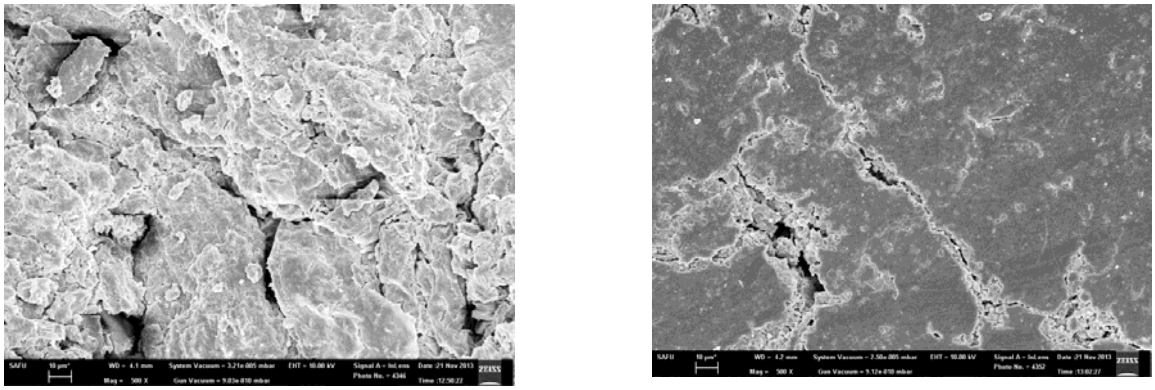
На рис. 2б видно, что в результате брикетирования появилась гладкая поверхность с наличием трещин размером до 20 мкм. Частичное спекание и расплав компонентов торфа при воздействии высокой температуры и давления в момент контакта приводят к образованию гладкой прочной пленки. Трещины на ее поверхности обусловлены как структурными особенностями самого образца, так и технологией производства брикетов.

Сложность состава торфа связана с наличием в его объеме органического, минерального и водного компонентов. Следует отметить, что перечисленные составляющие являются сложными [2]. В торфе содержатся частицы самой разнообразной формы и размеров (от долей микрометра до нескольких сантиметров и даже метров – остатки древесных пород), поэтому торф является полидисперсной или полифракционной системой. Помимо растительных остатков в нем могут присутствовать останки микроорганизмов, такие как яйца простейших, круглые черви и т.д. (рис. 3 а, б).

В зависимости от условий отдельные компоненты торфяных систем могут находиться в различных состояниях: коллоидном, истинного раствора и др. Поэтому торф относят к полуколлоидным системам. Примером таких систем в торфе являются гуминовые вещества. Высокомолекулярность торфа обусловлена его генезисом, так как растения-торфообразователи являются природными полимерами [2].

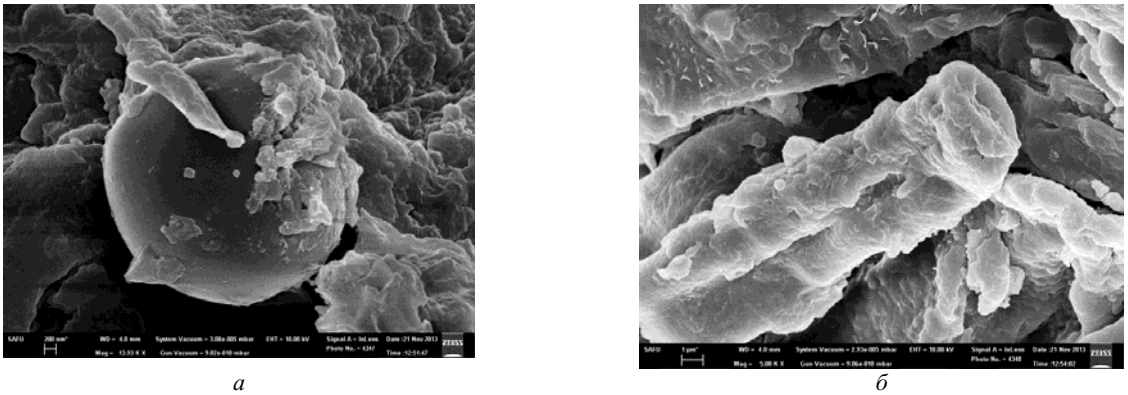
По анализу полученных снимков можно сделать вывод о качестве топливных брикетов, получаемых в процессе прессования и об эффективности самого процесса. Наличие и отсутствие трещин, их форма и ширина позволяют судить о степени гидрофобности образцов. Чем меньше трещин имеет брикет, тем дольше он будет сопротивляться воздействию влаги.

В ходе проведенных работ был изучен элементный состав торфяных брикетов и торфа, используемого в качестве сырья для их производства в Северо-Западном регионе. Были проведены дифрактометрические исследования, а также выполнены работы на электронном микроскопе, в ходе которых удалось детально изучить внутреннюю структуру торфяных брикетов. Полученные результаты позволили оценить высокое качество этого вида топливно-энергетических ресурсов.



а *б*

Рис. 2. Электронные микрофотографии торфяного брикета (500-кратное увеличение):
а – внутренняя часть; б – внешняя пленка



а *б*

Рис. 3. Электронные микрофотографии элементов торфяного брикета (500-кратное увеличение):
а – яйцо простейшего микроорганизма; б – останки круглого червя

Все полученные данные являются неотъемлемой частью общей картины физико-химических и механических процессов, протекающих в прессовальных и теплогенерирующих установках при воздействии температурного фактора, и вносят существенный вклад в понимание этих процессов.

Литература

1. Концепция охраны и рационального использования торфяных болот России / под общ. ред. чл.-корр. РАСХН Л.И. Инишевой. – Томск, 2005.

2. *Лиштван, И.И.* Физика и химия торфа / [И.И. Лиштван и др.]. – М., 1989.

3. *Любов, В.К.* Повышение эффективности энергетического использования биотоплив / В.К. Любов, С.В. Любова. – Архангельск, 2010.

4. Сжигание кускового и фрезерного торфа в топках промышленных установок. – Мн., 1952.

5. *Солопов, С.Г.* Торфяные машины и комплесы / С.Г. Солопов, Л.О. Горцакалян, Л.Н. Самсонов. – М., 1973.

УДК 621.1.016(035.5)

Н.Н. Синицын, К.С. Пронин

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА АБСОРБЦИИ АММИАКА КАПЛЯМИ ВОДЫ

В статье представлены результаты исследования диффузии аммиака в капле воды при малых диффузионных числах Фурье. Получено уравнение коэффициента адаптации для уравнения диффузии аммиака в капле воды.

Массоотдача, концентрация, аммиак, диффузия, коэффициент адаптации.

The paper presents the results of studying the diffusion of ammonia in the drop of water with small diffusion Fourier numbers. The equation of adaptation coefficient for the diffusion equation in the drop of ammonia water has been obtained.

Mass transfer, concentration, ammonia, diffusion, adaptation coefficient.

Оценка траектории и скорости движения капель воды необходима при расчете абсорбции аммиака, оптимизации аэродинамики полых абсорберов с целью уменьшения брызгоуноса. Для определения количества поглощенного аммиака каплей необходимо рассчитать поля концентраций аммиака в капле воды с учетом химических реакций. Допуская аналогию между процессами тепло- и массоотдачи, можно определить концентрацию по сечению капли при малых значениях диффузионного числа Фурье Fo'.

В жидкой фазе значения Fo' по порядку величины в 10000 раз меньше, чем в газовой фазе (из-за соответствующего различия коэффициентов диффузии $D_Ж$ и $D_Г$), и в этом случае решение уравнения диффузии [2]:

$$\frac{\partial C}{\partial \tau} = D \cdot \left[\frac{\partial^2 C}{\partial r^2} + \frac{2}{r} \cdot \frac{\partial C}{\partial r} \right], \qquad (1)$$

проводим при граничных условиях первого рода. C_P = const – концентрация у границы раздела фаз принимается постоянной.

При численном решении задачи разностным методом решение может быть получено лишь в некотором конечном множестве точек, называемых сеткой. Процедура численного решения начинается с замены дифференциального уравнения его конечно-разностным аналогом. Для решения уравнения (1) используется неявный конечно-разностный метод.

Расчет распределения концентрации аммиака по сечению капли представлен на рис. 1 при физической абсорбции.

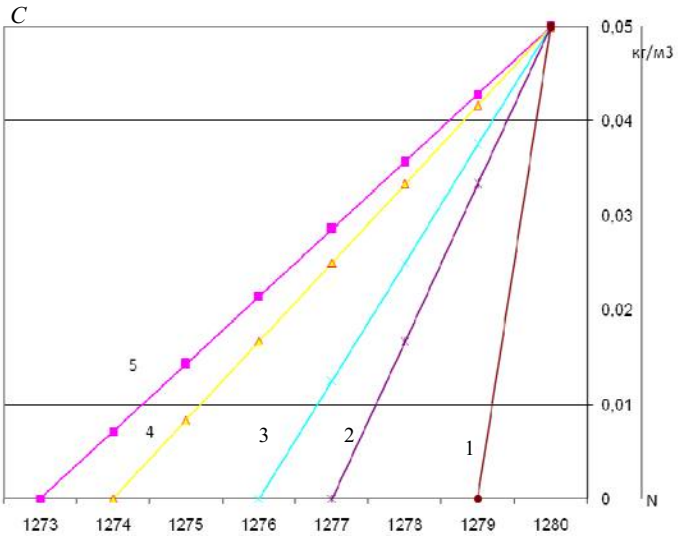


Рис. 1. Распределение концентраций по сечению капли в различные моменты времени:
1 – Fo = 1,056 · 10^{-6}; 2 – Fo = 1,232 · 10^{-6};
3 – Fo = 2,112 · 10^{-6}; 4 – Fo = 2,992 · 10^{-6};
5 – Fo = 4,048 · 10^{-6}

Диаметр капли 2 · 10^{-3} м. Число Fo рассчитывалось по формуле Fo = $D_Ж \cdot \tau / R_0$, где $D_Ж$ – коэффициент диффузии аммиака в воде, м^2/с; τ – время, с; R_0 – радиус капли, м; N – число узлов расчетной сетки при граничных условиях первого рода.