

- состоянию отдельных узлов, требует перехода к индивидуальному планированию ремонтных процедур. Это можно осуществить только с учетом ремонтной истории за весь период эксплуатации, а не на основе «назначенного» ресурса.
3. Ремонтно-эксплуатационная история паровой турбины, как электронная база данных, позволит перейти к планированию ремонтных работ

(срок и объёмы ремонта, заказ запчастей и др.) с учетом состояния отдельных узлов, условий эксплуатации, наработки, числа пусков, сведений о дефектах. Это повысит надёжность паровых турбин по экспертной оценке на 10...14 % и уменьшит количество аварийных остановов.

Работа выполнена при поддержке ФЦП «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» на 2009–2013 гг.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Родин В.Н., Шарапов А.Г., Мурманский Б.Е. и др. Ремонт паровых турбин / под общ. ред. Ю.М. Бродова. – Екатеринбург: Изд-во УГТУ-УПИ, 2002. – 211 с.
2. Литвак В.В., Панин В.Ф. Надёжность теплоэнергетического оборудования и экологическая обстановка вокруг ТЭС. – Томск: Изд-во НТЛ, 2009. – 280 с.
3. Резинских В.Ф., Гладштейн В.И., Авруцкий Г.Д. Увеличение ресурса длительно работающих турбин. – М: Издательский дом МЭИ, 2007. – 296 с.
4. СО 34.04.181-2003. Правила организации технического обслуживания и ремонта оборудования, зданий и сооружений электростанций и сетей. – М., 2004.

Поступила 28.02.2012 г.

УДК 536.46+532.685

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ПАРАМЕТРОВ ЗАЖИГАНИЯ ТОРФА В УСЛОВИЯХ ЕГО ПРОМЫШЛЕННОГО СКЛАДИРОВАНИЯ

Р.Н. Кулеш, А.Н. Субботин

Томский политехнический университет
E-mail: ronikul@tpu.ru, subbot@inbox.ru

Определены истинные теплофизические характеристики торфа и конденсированных продуктов его термического разложения (кокса, золы). Установлено критическое значение влажности торфа, при котором может произойти его возгорание. Найдены зависимости времени загорания и начальной температуры источника загорания от влажности торфа.

Ключевые слова:

Торф, загорание, влажность, физические и кинетические параметры торфа.

Key words:

Peat, ignition, humidity, physical and kinetic parameters of peat.

В России учтено и частично разведано 65868 торфяных месторождений общей площадью 80,5 млн га с запасами около 235 млрд т или 47 % от всех мировых запасов торфяного сырья, что делает торф особо важным и стратегически значимым сырьем, особенно учитывая ограниченность, а также приближающуюся исчерпаемость запасов традиционных горючих полезных ископаемых (нефть, газ, уголь) [1].

В целом технологию использования торфа, начиная с его добычи и заканчивая конечным продуктом, можно представить в виде схемы: осушение месторождения, добыча, складирование изъятых торфа, транспортировка, складирование для хранения, использование в качестве топлива. При использовании торфа для любых целей существует ряд общих операций, в основном связанных с добычей сырья и его подготовкой к использованию, которые характеризуются повышенной пожарной опасностью, т. к. из торфа выводится влага. Необходимо отметить, что степень пожароопасности торфа значи-

тельно выше, чем угля. Он легко самовозгорается и является горючим материалом, который может воспламениться от небольшого источника загорания [2, 3]. Зачастую при складировании торфа наблюдается его самовозгорание [4]. Причиной самовозгорания торфа являются взаимосвязанные биохимические, физические и химические процессы.

По другому сценарию происходит возгорание торфа от внешнего теплового источника. В большинстве случаев механизм рассматриваемого явления определяется тем, что вначале отдельные горячие очаги (электрическая, механическая или тепловая искра, горящая спичка, тлеющий окурочок и т. д.) попадают на поверхность торфа. В случае если тепловой источник имеет достаточную энергию, может произойти возгорание торфа и заглубление очага горения, после чего тушение пожара становится более проблематичным, а в отдельных условиях и невозможным.

Обзор литературных источников [5–10] показал, что в научной литературе отсутствуют экспе-

риментальные данные о механизме зажигания и горения торфа по описанному выше сценарию, и, возможно, это не позволяет решать практические задачи по оперативному предотвращению и тушению торфяных пожаров как при его складировании, так и в естественных условиях, что отражает актуальность данной работы. Для решения задачи можно использовать математическое моделирование процессов тепломассопереноса в неоднородных средах [5], но для этого необходимо знать истинные плотности и теплофизические параметры торфа и конденсированных продуктов его термического разложения. К сожалению, в литературе не удалось обнаружить истинные значения указанных выше величин.

Определение истинных теплофизических параметров торфа и конденсированных продуктов его термического разложения

Теплофизические характеристики торфа c_p и λ определялись методом динамического калориметра с помощью измерителей теплоемкости ИТ- c_p -400 и теплопроводности ИТ- λ -400. Из аналитических проб торфа, кокса и золы посредством прессования до давления $2,5 \cdot 10^7$ Па были созданы образцы, по которым определялись истинные плотности исследуемых материалов. Под истинной плотностью вещества понимается плотность образца этого вещества при отсутствии в нем пор (полученного прессованием при больших давлениях). Значения истинных плотностей исследуемых образцов оказались равными: торф – 1560, кокс – 1430, зола – 1720, кг/м³. Погрешности определения истинной плотности не превышала 4,1 %.

Условия эксплуатации приборов ИТ- c_p -400 и ИТ- λ -400 не позволяют проводить измерения теплофизических свойств образцов при потере массы, поэтому теплоемкость и теплопроводность торфа определена до температуры 398 К, теплоемкость и теплопроводность кокса – до 498 К, а теплоемкость золы найдена в диапазоне максимально возможной температуры, создаваемой прибором, – до 673 К. Суммарные погрешности определения теплофизических характеристик торфа не превышали $\delta c_p \leq 8,4$ %, $\delta \lambda \leq 7,37$ %.

В результате проведения экспериментальных исследований получены зависимости теплоемкости и теплопроводности исследуемых веществ от температуры (рис. 1).

Немонотонный характер зависимостей c_p и λ от температуры обусловлен, вероятно, неоднородностью состава торфа и соответственно разными режимами нагрева входящих в его состав компонентов. Кроме того, границы немонотонных изменений для некоторых параметров практически совпадают с погрешностями измерений. Поэтому для численных расчетов удобнее использовать средние значения этих теплофизических величин. Как следует из анализа зависимостей $c_p(T)$, истинные теплоемкости золы и кокса в исследованном диапазоне температур можно считать постоянными.

С учетом этого средняя истинная теплоемкость золы равна 884,9 Дж/(кг·К), кокса – 706,7 Дж/(кг·К), а истинные значения теплопроводности торфа и кокса равны соответственно 0,493 и 0,398 Вт/(м·К).

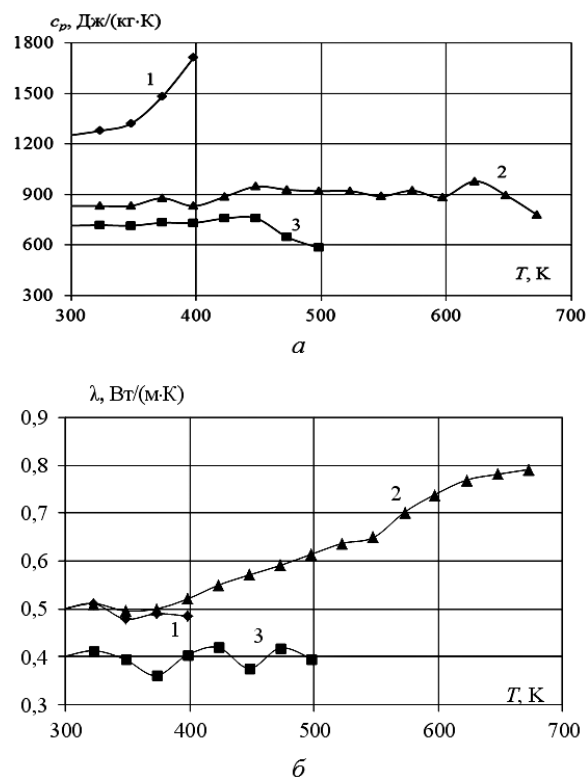


Рис. 1. Зависимости истинной теплоемкости (а) и теплопроводности (б) материалов от температуры: 1) торф; 2) зола; 3) кокс

Для оценки достоверности полученных экспериментальных данных были проведены сравнения с известными значениями $\lambda(T)$ [6]. Так, для торфяных плит плотностью 150, 200, 250, 300 кг/м³ теплопроводность в диапазоне изменения температур 273...373 К равна соответственно 0,045...0,059, 0,052...0,066, 0,06...0,074, 0,067...0,081 Вт/(м·К). Коэффициент теплопроводности торфа с плотностью 400 кг/м³, согласно данным [6], равен 0,128 Вт/(м·К). Анализируя справочные данные, приведенные выше, приходим к выводу, что возрастание плотности торфа в два раза приводит к увеличению его теплопроводности примерно в два раза. Если воспользоваться этой закономерностью и для других значений плотности, то получим, что при плотности торфа 1600 кг/м³ его теплопроводность должна быть равна 0,512 Вт/(м·К). В экспериментах, представленных на рис. 2, при плотности торфа 1560 кг/м³ средняя теплопроводность составляет 0,493 Вт/(м·К). Этот анализ свидетельствует о достоверности полученных результатов.

Физическая постановка задачи зажигания

Так как торф хранится в виде торфяных брикетов (торфяных пластов) определенных размеров, то рассматривалась задача воспламенения брикета. Торф Бакчарского месторождения определенной

плотности (370 кг/м^3) помещался в кювету цилиндрической формы с перфорированной боковой поверхностью (рис. 2). На верхней поверхности торфяного пласта помещался цилиндрический источник тепла радиуса r_0 . Ставилась задача определения параметров зажигания. Считалось, что начало координат помещено в центр основания источника зажигания, оси x и y направлены вдоль верхней поверхности, а ось z перпендикулярна верхней поверхности торфяного пласта.

К исследуемым параметрам зажигания торфа относятся время задержки зажигания и минимальная температура источника зажигания, необходимая для инициирования воспламенения. Под основание теплового источника на разной глубине и разном расстоянии от оси симметрии z располагались термопары, которые в течение всего времени проведения эксперимента фиксировали температуру в конкретных точках торфяного пласта.

Источник зажигания

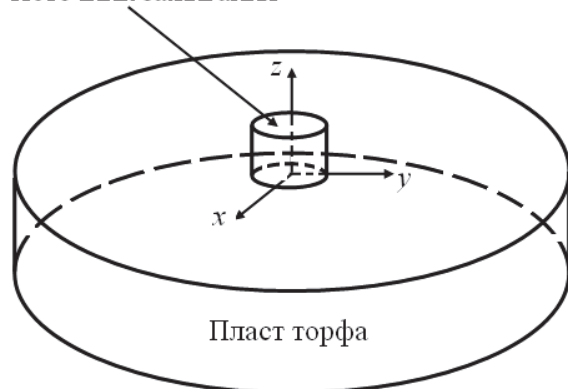


Рис. 2. Схема проведения опытов

Определение параметров зажигания торфа

Известно, что влажность влияет на процессы воспламенения и горения, поэтому были проведены эксперименты по воспламенению нагретым телом образцов торфа различной влажности. Результаты экспериментальных исследований процессов теплообмена в слое торфа при его зажигании локальным источником тепла представлены на рис. 3. Получены значения времени задержки зажигания (t_z) торфа при различной его влажности. Все эксперименты проводились при минимальном запасе энергии источника зажигания, при которой происходило зажигание торфа во всех проведенных экспериментах. Так как, зная начальную температуру и размеры источника зажигания, можно определить начальную энергию источника, то при проведении экспериментов измерялась начальная и текущая температура источника зажигания и дополнительно в определенных точках слоя торфа. На представленных зависимостях начальная температура соответствует максимальному (стартовому) значению температуры кривая 1. Прочие кривые на рис. 3 показывают изменение температуры в слое торфа в определенных точках, местоположение которых известно. На рисунках введена сле-

дующая система обозначений координат термопар:
 $\circ$ — $x=0$; $y=0$; $z=-2 \cdot 10^{-2}$, м; $\blacktriangle$ — $x=2 \cdot 10^{-2}$; $y=0$; $z=-2 \cdot 10^{-2}$, м; $\times$ — $x=2 \cdot 10^{-2}$; $y=-2 \cdot 10^{-2}$; $z=-2 \cdot 10^{-2}$, м; $\blacksquare$ — $x=0$; $y=-2 \cdot 10^{-2}$; $z=-2 \cdot 10^{-2}$, м; $\times$ — $x=-2 \cdot 10^{-2}$; $y=-2 \cdot 10^{-2}$; $z=-2 \cdot 10^{-2}$, м; $\bullet$ — $x=-2 \cdot 10^{-2}$, м; $y=0$; $z=-2 \cdot 10^{-2}$, м; $\square$ — $x=-2 \cdot 10^{-2}$, м; $y=2 \cdot 10^{-2}$; $z=-2 \cdot 10^{-2}$, м; Δ — $x=0$; $y=0$; $z=-4 \cdot 10^{-2}$, м; $-$ — $x=2 \cdot 10^{-2}$; $y=2 \cdot 10^{-2}$; $z=-2 \cdot 10^{-2}$, м; $\diamond$ — $x=0$; $y=0$; $z=-2 \cdot 10^{-2}$, м; $*$ — $x=2 \cdot 10^{-2}$; $y=0$; $z=-4 \cdot 10^{-2}$, м; $\blacklozenge$ — $x=2 \cdot 10^{-2}$; $y=-2 \cdot 10^{-2}$; $z=-4 \cdot 10^{-2}$, м.

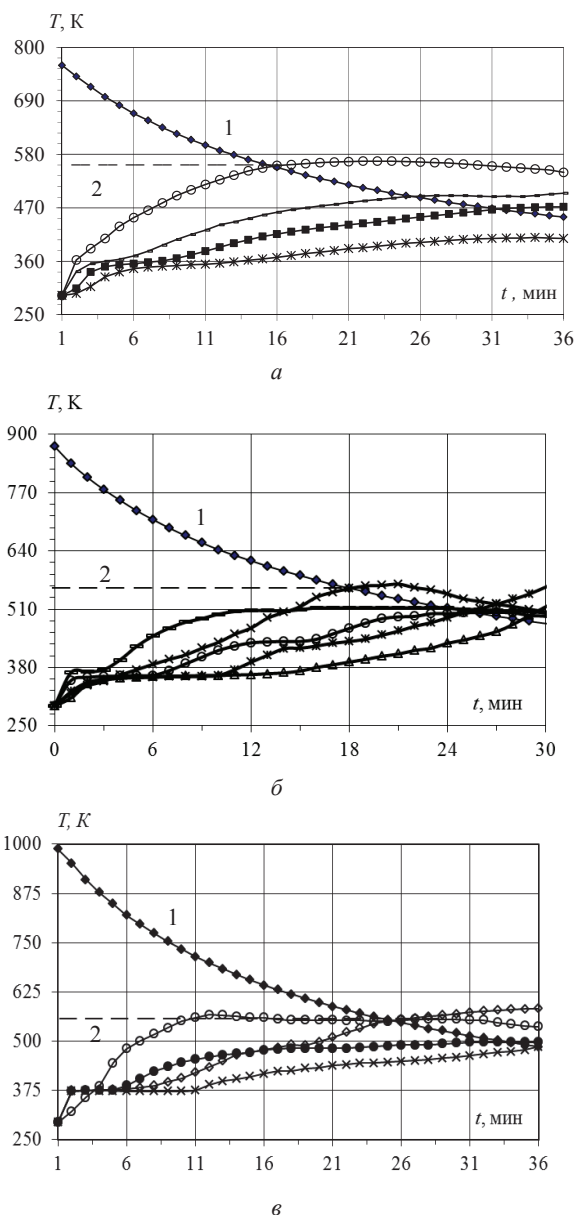


Рис. 3. Изменение температуры в массиве торфа, влажность которого: а) 10; б) 20; в) 30 %

В связи с густотой расположения кривых на представленных рисунках приведена только часть экспериментальных зависимостей с характерными изменениями температуры в относительно удаленных друг от друга точках. Пунктирная линия характеризует температуру зажигания, а точка пересечения пунктирной линии с кривой 1 — время

зажигания. Как следует из зависимостей рис. 3, с увеличением влажности торфа время загорания возрастает. При контакте источника загорания со слоем торфа его температура начинает монотонно снижаться (кривые 1). При этом источник загорания отдает свою энергию как в слой торфа посредством теплопроводности и излучения, так и в окружающую среду (приземный слой воздуха). Данный процесс приводит к повышению температуры в массиве торфа, что фиксируется установленными в нем термопарами. Это продолжается до момента времени, когда температуры источника загорания и в какой-либо из фиксируемых точек области исследования торфа становятся одинаковыми. Температура, фиксируемая в этот момент, является температурой загорания торфа. В последующей стадии эксперимента происходит дальнейшее снижение температуры источника.

Необходимо отметить, что в момент загорания торфа в какой-либо области фиксируется локальное увеличение температуры, что является дополнительным подтверждением наличия возгорания торфа.

По полученным значениям температур можно проследить распространение очага горения. Продвижение очага горения от одной контролируемой области к другой отчетливо наблюдается на рис. 3, б, где происходит локальное повышение температуры в момент времени 21 мин. в точке, в которой до этого момента возгорания не происходило. В дальнейшем очаг горения переместился в другую область, что привело к снижению температуры в рассматриваемой области.

Из приведенных выше зависимостей следует, что с повышением влажности торфа процесс испарения влаги становится продолжительнее (испарение осуществляется в пределах первых 3...9 мин. эксперимента). Испарение влаги интенсивно охлаждает зону реакции горения и в конечном итоге приводит к уменьшению ее размеров, с одной стороны, вследствие общего дефицита кислорода, необходимого для реакции горения, а, с другой стороны, из-за расхода энергии на испарение. В свою очередь, фильтрация испаренной влаги в порах массива торфа приводит к наиболее полному прогреву всего слоя торфа (рис. 3, в). Данное явление отражается уменьшением разброса ΔT кривых, характеризующих температуры в массиве торфа (рис. 3, а – $\Delta T \approx 200$ К, рис. 3, в – $\Delta T \approx 100$ К).

Для оценки влияния теплообмена источника загорания с окружающей средой на параметры загорания проведена серия экспериментов с теплоизолированным от окружающей среды источником. Для чего на источник загорания помещался слой тепловой изоляции, состоящей из муллита. В этих условиях, пренебрегая тепловыми потерями через тепловую изоляцию, можно полагать, что источник загорания передает свою энергию только в массив торфа. Результаты экспериментов с изменением условий внешнего теплообмена (тепловой изоляцией источника загорания) приведены на

рис. 4. Для оценки тепловых потерь источника загорания через изоляцию температура тепловой изоляции контролировалась (кривая 3 на рис. 4).

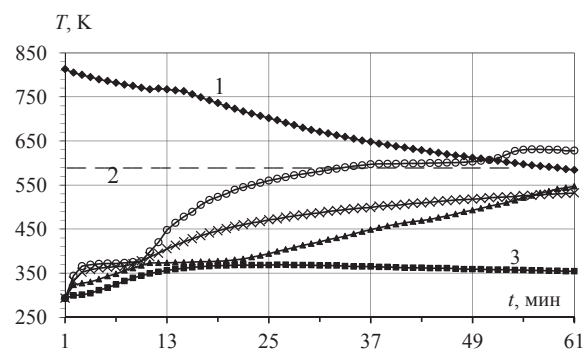


Рис. 4. Изменение температуры в массиве торфа влажностью 20 % для теплоизолированного источника загорания

Данная серия экспериментов характеризуется более «плавным» снижением температуры источника загорания (как следствие минимизации тепловых потерь в окружающую среду) с увеличением времени задержки загорания. Данное обстоятельство, по-видимому, вызвано быстрым прогревом некоторого объема торфа под источником загорания и, как следствие, интенсивной газификацией (пиролизом) этого и прилегающего объема торфа. Образовавшиеся продукты пиролиза, смешиваясь с парами воды, способствуют увеличению «выноса» тепловой энергии из массива торфа в образовавшихся конвективных потоках, которые, в свою очередь, создают дополнительный слой тепловой изоляции, состоящий из горячих продуктов газификации и водяного пара, что способствует снижению теплообмена источника загорания с окружающей средой и увеличивает время его остывания. Приведенный эффект также препятствует проникновению кислорода в массив торфа, что также способствует увеличению времени задержки загорания (время загорания равно 52 мин.).

На всех представленных графиках приведен диапазон времени, характеризующий в соответствии с целью исследований только возгорание массива торфа, поэтому дальнейшее распространение очага горения не приводится. Однако необходимо отметить, что во всех проведенных экспериментах было зарегистрировано полное выгорание исследуемого образца торфа, т. е. не было случаев локального выгорания с последующим завершением реакций горения. Этот результат позволяет сделать вывод, что при определенном запасе энергии локальные источники тепла могут стать причиной больших пожаров.

Установлено, что при влажности 35...40 % исследуемый торф не загорается, т. к. под источником загорания быстро образуется сгоревший слой, а энергия, передаваемая через этот теплоизолирующий слой, расходуется лишь на испарение влаги. Водяные пары, в свою очередь, создавая конвективные потоки, вытесняют необходимый для

реакции кислород и препятствуют его проникновению под очаг горения. К моменту, когда установятся необходимые условия массообмена области химических превращений с окружающей средой, источник зажигания уже не обладает энергией, необходимой для инициирования горения.

Не менее важно и то, что полученные результаты позволили сделать количественные оценки по всем исследованным параметрам, тем самым могут быть основой для дальнейшего использования в математической модели и базой для разработки рекомендаций по минимизации возгораний торфа и их локализации.

Анализ полученных результатов

Обобщение результатов экспериментов с различными условиями теплообмена источника зажигания с окружающей средой приведено на рис. 5. На основании анализа приведенных результатов можно утверждать, что увеличение влажности торфа на 10 % приводит к увеличению периода времени задержки зажигания в среднем на 5...7 мин. (рис. 5, а).

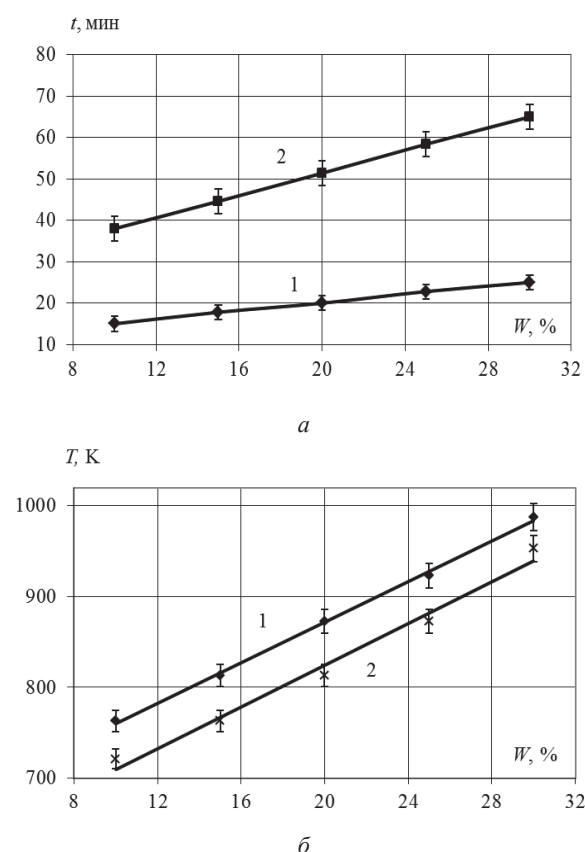


Рис. 5. Зависимость времени зажигания (а) и начальной температуры источника зажигания (б) от влажности торфа: 1 – без изоляции; 2 – в тепловой изоляции

Наряду с этим установлено, что повышение плотности торфа так же приведет к увеличению времени задержки зажигания и уменьшению ядра горения, т. к. при этом замедляется доставка кислорода к зоне горения. Данное положение, вытекающее из результатов экспериментов, подтверждают выводы теоретической работы [7].

Причиной зафиксированного в экспериментах рассеяния величины времени задержки зажигания (доверительные интервалы на рис. 5) при определенной начальной температуре источника зажигания являются, по-видимому, локальные неоднородности различных характеристик торфа под источником нагрева и погрешности экспериментов. Кроме того, хотя при подготовке экспериментов был обеспечен хороший контакт источника зажигания с рабочим веществом (в холодном состоянии), но при установке горячего источника возможны некоторые неточности вследствие стремления к минимизации затрат времени на эту операцию, что может являться причиной локального ухудшения контакта поверхностей источника и торфа.

Выводы

1. Установлено, что в среднем при неизменных размерах источника зажигания увеличение влажности торфа (на примере торфа Бакчарского месторождения Томской области) на 10 % требует увеличения температуры источника зажигания на 100...110 К. В экспериментах с источником зажигания в тепловой изоляции интервал такого повышения температуры при увеличении влажности торфа на ту же величину 10 % находится в пределах 80...90 К.
2. Выявлено, что при повышении влажности торфа до 35...40 % возгорания не происходило даже при нагреве источника зажигания до предельной для нагреваемой печи температуры – 1173 К. Таким образом горячий источник зажигания конечных размеров не может стать причиной возгорания массива торфа указанной влажности.
3. В серии экспериментов с источником зажигания в тепловой изоляции время задержки зажигания увеличивается в 2...2,5 раза при некотором снижении начальной температуры источника.
4. Полученные в работе экспериментальные данные и их сопоставление с опубликованными результатами других авторов подтверждают выбор торфа как объекта исследования с типичными свойствами, что позволяет применять основные результаты работы к большинству торфов других месторождений.

Работа выполнена в рамках ФЦП «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России на 2009–2013 годы» по мероприятию 1.3.1, номер соглашения 14.В37.21.1496.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Смольянинов С.И., Маслов С.Г. Термобрикетирующие торфа. – Томск: Изд-во ТГУ, 1975. – 108 с.
2. Афанасьев А.Е., Чураев Н.В. Оптимизация процессов сушки и структурообразования в технологии торфяного производства. – М.: Недра, 1992. – 288 с.
3. Никифоров В.А. Разработка торфяных месторождений и механическая переработка торфа. 2-е изд., перераб. и доп. – Минск: Выща школа, 1979. – 400 с.
4. Попов М.В., Шабаров А.М., Гушин А.И. Энергетическое использование фрезерного торфа. – М.: Энергия, 1974. – 304 с.
5. Субботин А.Н. Тепломассоперенос при зажигании и горении структурно неоднородных сред: дис. ... д-ра физ.-мат. наук. – Томск, 2011. – 307 с.
6. Теплотехнический справочник: В 2-х т. / под ред. В.Н. Юренина, Н.Д. Лебедева. – М.: Энергия, 1976. – Т. 2. – 896 с.
7. Субботин А.Н., Кулеш Р.Н. Исследование механизма и минимальной энергии зажигания торфа источником тепла // Пожарная безопасность. – 2009. – № 4. – С. 77–83.
8. Субботин А.Н. Закономерности развития подземного пожара при разных условиях тепло- и массообмена с внешней средой // Тепломассообмен ММФ. – Минск: Изд-во НАНБ, 2000. – Т. 4. – С. 224–231.
9. Субботин А.Н. О некоторых особенностях распространения подземного пожара // ИФЖ. – 2003. – Т. 76. – № 5. – С. 159–165.
10. Субботин А.Н. Распространение торфяного пожара при разных условиях тепломассообмена с внешней средой // Пожаровзрывобезопасность. – 2007. – Т. 16. – № 5. – С. 42–49.

Поступила 20.06.2012 г.

УДК 620.93

ОПТИМИЗАЦИОННЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ЭНЕРГОТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ПРОИЗВОДСТВА СИНТЕТИЧЕСКИХ ЖИДКИХ ТОПЛИВ И ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ ИЗ УГЛЯ С СИСТЕМОЙ ОЧИСТКИ ПРОДУКТОВ ГАЗИФИКАЦИИ

Э.А. Тюрина, О.В. Скрипченко

Институт систем энергетики им. Л.А. Мелентьева СО РАН, г. Иркутск
E-mail: tyurina@isem.sei.irk.ru

Приведены результаты оптимизационных исследований перспективной технологии переработки угля в синтетическое жидкое топливо и электроэнергию на энерготехнологической установке комбинированного производства синтетических жидких топлив и электроэнергии с учетом затрат в систему очистки продуктов газификации от H_2S и CO_2 и разной степени удаления CO_2 из продуктов газификации. Представлены математические модели системы очистки продуктов газификации методом Ректизол и энерготехнологической установки в целом. Основное внимание уделено оптимизационным исследованиям системы очистки продуктов газификации методом Ректизол.

Ключевые слова:

Энерготехнологические установки, синтетическое жидкое топливо, уголь, метанол, метод Ректизол.

Key words:

Coal-fired plants, synthetic liquid fuel, coal, methanol, Rectisol method.

Реализация угольных проектов в электроэнергетике сдерживается вследствие низкой энергоэффективности и экологичности сжигания рядовых углей, высоких затрат на доставку энергии угля, особенно низкокалорийных, к конечным потребителям. В связи с этим возникает большой интерес к проблеме переработки углей в синтетическое жидкое топливо как альтернативное энергетическое топливо.

Одним из наиболее перспективных направлений переработки угля является его газификация с последующим синтезом синтетических жидких топлив в энерготехнологических установках комбинированного получения синтетического жидкого топлива и электроэнергии. Интерес к данной технологии определяется высокой производительностью процесса синтеза синтетического жидкого топлива, достаточной экологической чистотой процесса и производством экологически чистого топлива.

Работы по математическому моделированию энерготехнологических установок синтеза различных синтетических жидких топлив (метанол, диметиловый эфир и др.) и их технико-экономические исследования выполняются в Институте систем энергетики им. Л.А. Мелентьева СО РАН (г. Иркутск) в течение длительного времени. Разработаны математические модели отдельных блоков энерготехнологических установок синтеза синтетических жидких топлив и установок в целом, найдены оптимальные схемно-параметрические решения по установкам и условия их конкурентоспособности [1–4].

Следует отметить, что в ранее проводимых исследованиях энерготехнологических установок системы очистки синтез-газа от соединений серы и диоксида углерода рассматривались в упрощенном виде с использованием экспертных данных по удельным затратам энергии и капитальным вложениям. В то же время при каталитическом синтезе