

УДК 541.126

В.А. Горельский, К.Н. Жильцов**ИССЛЕДОВАНИЕ ВОЗНИКНОВЕНИЯ ТОРФЯНЫХ ПОЖАРОВ
ВСЛЕДСТВИЕ КОЛЕБАНИЙ ТЕМПЕРАТУР**

Исследована проблема самовозгорания торфяников под действием периодических по времени изменений окружающей среды. Основная цель – изучить степень влияния годовых и суточных колебаний температуры на возникновение самовозгорания.

Ключевые слова: *самовозгорание, торфяники, колебания температуры.*

Известно, что заканчивающиеся воспламенением саморазогревы таких материалов, как торф, являются причиной многих лесных пожаров. Существенно, что в этом случае саморазогревы протекают при наличии периодических высокочастотных (суточных) и низкочастотных (сезонных) колебаний температуры воздуха.

Теория теплового взрыва (ТВ) была развита лишь для процессов с постоянной или линейно растущей во времени температурой среды, окружающей реакционно способное вещество [1, 2]. Эти исследования были стимулированы главным образом запросами инженерной и лабораторной практики, относящимися к технологии взрывоопасных энергетических материалов (порохов, взрывчатых веществ и т.п.). Теория самовоспламенения пористых горючих материалов, развитие саморазогрева в которых может зависеть от интенсивности подвода газообразного окислителя внутрь реакционного объема, была развита также только для случая постоянной температуры окружающей среды [3]. Между тем исследование влияния колебаний внешней температуры на параметры ТВ представляет как теоретический, так и практический интерес. Как известно, при проведении лабораторных экспериментов по определению критических условий ТВ порохов и взрывчатых веществ температура в термостате всегда колеблется около заданного значения с некоторой, хотя обычно сравнительно небольшой амплитудой. Но в условиях естественного нахождения или специального хранения больших масс реакционно-способных материалов в складских или полевых условиях колебания температуры атмосферного воздуха (суточные и особенно сезонные), окружающего реакционно-способное вещество, бывают очень большими.

С учетом огромного ущерба, связанного с указанными пожарами, исследование влияния колебаний температуры среды на критические условия и период индукции ТВ имеет большое значение для современной теории катастроф.

В предшествующих работах [4, 5] были проведены расчеты, характеризующие качественные особенности процесса. Установлено, что колебания температуры окружающей среды могут существенно влиять на условия возникновения ТВ. Расчеты показали, что даже при очень небольших амплитудах колебаний внешней температуры, термограммы развития разогрева вблизи критического предела имеют очень своеобразный характер. Размах колебаний температуры вещества может существенно превосходить амплитуду колебания на границе континуума. В работах [6–8] был проведен количественный теоретический анализ влияния параметров колебаний внешней температуры на критические условия и период ин-

дукции ТВ. Установлено, что влияние температурных колебаний на критическое условие и период индукции при достаточно высоких частотах и в области сравнительно небольших амплитуд не существенно. В области малых частот влияние параметров температурных колебаний на критическое условие и, особенно, на период индукции, даже при относительно малых амплитудах, может быть очень сильным. В работах [9, 10] представлены исчерпывающий обзор работ по теории торфяных пожаров, а также физико-математическая модель процессов, возникающих в торфяном слое при возгорании. Подробно описаны процессы, происходящие при беспламенном горении торфа, и предложены актуальные направления дальнейших исследований.

Целью настоящей работы является применение теоретических знаний и их систематизация для практики предупреждения возгорания торфяников вследствие сезонных температурных колебаний. Рассматривается макрокинетика развития ТВ при наличии в окружающей среде гармонических колебаний температуры, с различной частотой ω и амплитудой T_A .

Постановка задачи

Физическая постановка задачи предусматривает, что слой торфа, сопряженный со слоем грунта, подвергается внешнему воздействию температурных колебаний. За счет температурного воздействия слой торфа $0 \leq x \leq h_t$ (рис. 1) прогревается, а по достижении критических значений реакция ускоряется и происходит самовоспламенение.

В качестве условий воспламенения, согласно теории теплового взрыва, принимаются следующие:

1. С учетом того, что временем протекания процесса пренебрегать нельзя и что по мере приближения к пределу эта величина сильно возрастает и становится больше времени достижения предвзрывного разогрева, условием самовоспламенения является прогрессивное увеличение разогрева, характеризующееся достижением максимума скорости неизотермической реакции [1].

2. Резкое уменьшение значений концентрации реакционноспособного вещества.

Задача теплового прогрева решалась в одномерной постановке (рис. 1), при протекании реакции первого порядка в среде, заполняющей полосу вещества толщиной $-h_g \leq x \leq h_t$, где $-h_g \leq x \leq 0$ – область грунта толщиной h_{grunt} , $0 \leq x \leq h_t$ – область торфа с толщиной h_{torf} , $x = 0$ – уровень раздела торфа и грунта, $x = h_t$ – граница раздела среды с атмосферой.

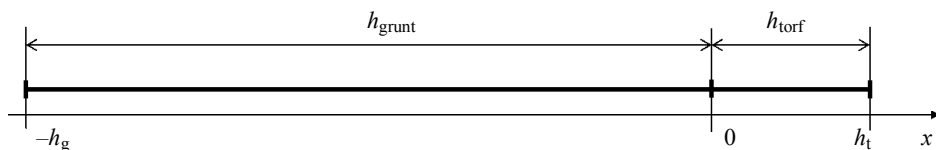


Рис. 1. Область решения: h_{grunt} – область грунта, h_{torf} – область торфа

Исходная система уравнений, описывающих изменение во времени температуры T плоского слоя вещества толщиной h и концентрация реакционноспособного вещества в нем a в области $0 \leq x \leq h_t$ имеет вид

$$C_t \rho_t \frac{\partial T}{\partial t} = q_t + \lambda_t \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} \quad (1)$$

где $q_t = \frac{\partial a_t}{\partial t} \rho_t Q_t$ – интенсивность тепловыделения на единицу объема, Вт/м³;

$$\frac{\partial a_t}{\partial t} = -a_0 k_0 \exp\left(-\frac{E}{RT}\right). \quad (2)$$

В области грунта $-h_g \leq x \leq 0$ рассчитывается только уравнение теплопроводности в виде

$$C_g \rho_g \frac{\partial T}{\partial t} = \lambda_g \frac{\partial^2 T}{\partial x^2}. \quad (3)$$

Здесь C – теплоемкость, ρ – плотность, Q – тепловой эффект реакции, k_0 – предэкспонента, E – энергия активации, R – универсальная газовая постоянная, λ – коэффициент теплопроводности.

Граничные условия для температуры записываются следующим образом:

$$\frac{\partial T}{\partial x}(-h_g) = 0, \quad T(h_t) = T_0 + T_a \sin(\omega t),$$

где T_0 – начальная температура торфа и грунта, T_a – амплитуда колебаний, ω – частота колебаний, t – время колебаний.

На границе раздела торф – грунт задается условие равенства тепловых потоков.

Начальные условия следующие: $T|_{t=0} = T_0 = 273 \text{ К}$, $a_0 = 1$.

Толщина грунта $h_g = \text{const} = 27 \text{ м}$, толщина слоя торфа $h_t = 2,5 \text{ м}$. Теплоемкость торфа и грунта $C_t = 1600 \text{ Дж/(кг·К)}$, $C_g = 3400 \text{ Дж/(кг·К)}$; плотность $\rho_t = 300 \text{ кг/м}^3$, $\rho_g = 1600 \text{ кг/м}^3$. Коэффициенты теплопроводности $\lambda_t = 0,0697 \text{ Вт/(м·К)}$ и $\lambda_g = 1,254 \text{ Вт/(м·К)}$; энергия активации $E = 49 \text{ кДж/моль}$; тепловой эффект реакции $Q = 20 \text{ мДж/кг}$; предэкспонента $k_0 = 0,1665 \text{ с}^{-1}$; универсальная газовая постоянная $R = 8,31 \text{ Дж/(моль·К)}$ [11]; амплитуда колебаний атмосферной температуры при низкочастотных колебаниях $T_a = 20 \text{ К}$, при высокочастотных $T_a = 7,5 \text{ К}$. Частота колебаний $\omega_{\text{год}} = (2\pi/86400) \cdot 365 \text{ с}^{-1}$ – одно колебание за год и $\omega_{\text{сут}} = (2\pi/86400) \text{ с}^{-1}$ – одно колебание в сутки.

Система дифференциальных уравнений с частными производными (1) – (3) и соответствующими начальными и граничными условиями решалась методом конечных элементов на равномерной сетке [12].

Анализ полученных результатов

Рассмотрим основные результаты расчетов. Основное внимание уделено влиянию амплитуды T_a и частоты ω температурных колебаний внешней среды, при постоянной толщине слоя торфа h_t , на величину периода индукции τ_{ind} . На рис. 2 представлены графики развития во времени разогрева и самовоспламенения торфяного слоя при колебаниях температуры внешней среды $T_a = 20 \text{ К}$, характерной для средней полосы России. Изменения параметров температуры (рис. 2, а), концентрации реакционноспособного вещества (рис. 2, б) и интенсивности тепловыделения в единице объема торфа (рис. 2, в) представлены в различных сечениях слоя торфа: у границы раздела торф – грунт (кривая $x = 0$; здесь и при $x = h$ значения параметров берутся на 1/2 толщины расчетной ячейки Δx); на поверхности торфяного слоя, граничащего с атмосферой (кривая $x = h$); и в центральном сечении слоя (кривая $x = 0,5h$). Графики температуры и интенсивности тепловыделения (рис. 2, а и в) показывают рост параметров, с последующим самовоспламенением,

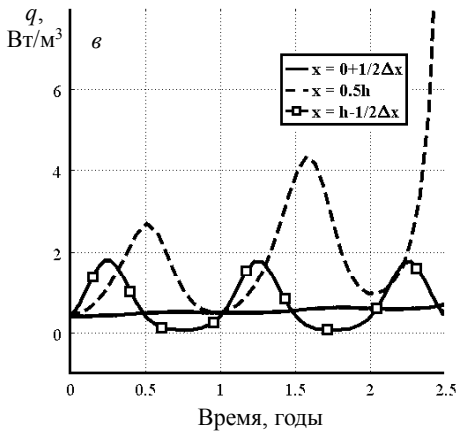
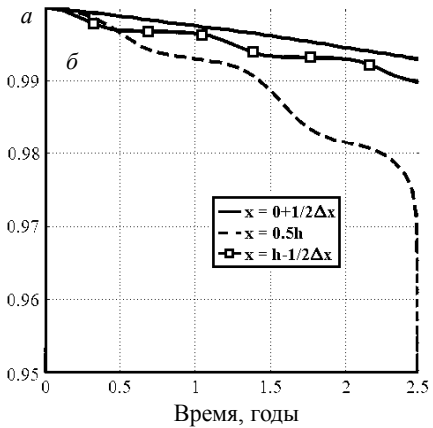
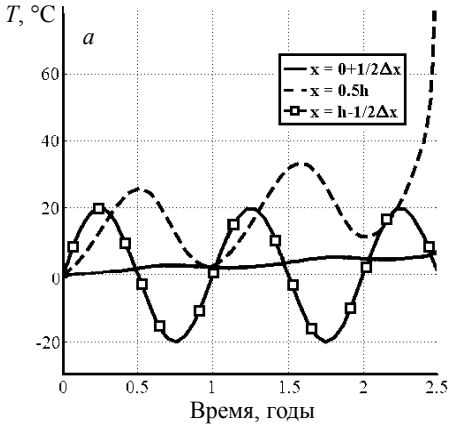


Рис. 2. Графики изменений температуры T (а), концентрации реакционноспособного вещества a (б) и интенсивности выделения тепла q (в), при $h_t = 2,5$ м, $T_a = 20$ К и $\omega_{\text{год}}$, в различных сечениях слоя торфа

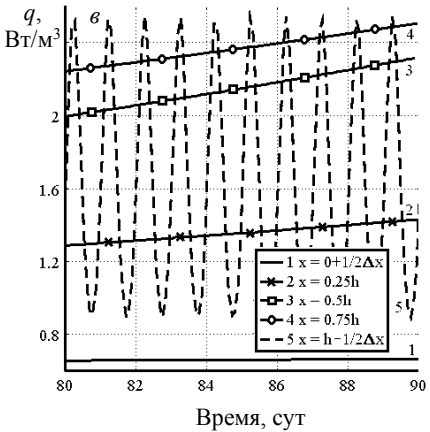
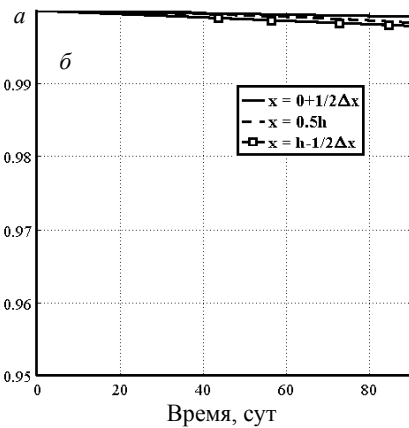
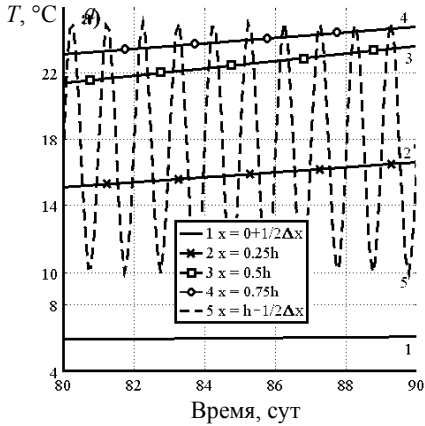


Рис. 3. Графики изменений температуры T (а), концентрации реакционноспособного вещества a (б) и интенсивности выделения тепла q (в), при $h_t = 2,5$ м, $T_a = 7,5$ К и $\omega_{\text{сут}}$, в различных сечениях слоя торфа

по истечении 2,5 лет. Они согласуются с графиками распределения концентрации (рис. 2, б) для торфа, на которых видно, как происходит постепенное выгорание вещества на глубинах.

На рис. 3 представлены графики для тех же параметров, но с учетом суточных колебаний температуры. В расчет брался период в 90 суток, соответствующий летнему периоду температур. Начальная температура системы торф – грунт, в данном случае, поднимается до $T_0 = 278$ К, этот выбор обусловлен данными, полученными при расчете низкочастотных (годовых) колебаний. Из графика на рис. 2, а видно, что на границе раздела торф – грунт в момент, близкий к тепловому взрыву, устанавливается температура $T_0 \approx 5$ °С (278 К), поэтому при расчете высокочастотных колебаний можно положить, что вся система имеет такую начальную температуру T_0 . Амплитуда суточных колебаний атмосферной температуры $T_a = 7,5$ К и изменяется в диапазоне $10 \leq T_a \leq 25$ К, который соответствует средним максимуму и минимуму летних суточных температур. Графики для температуры (рис. 3, а) и интенсивности тепловыделения в единице объема торфа (рис. 3, в) отражены, в целях наглядности, только для последних 10 суток периода. Видно, что при рассмотренных амплитудах колебаний самовоспламенение торфяного слоя вызывают только годовые колебания температуры. Суточные колебания, в выбранном временном диапазоне, не оказывают существенного влияния на рост температуры и выделение тепла. На графике для концентрации для суточных колебаний (рис. 3, б) видно, что уменьшение концентрации реакционноспособного вещества, в течение рассматриваемого периода, происходит очень медленно. Тем не менее уменьшение значений концентрации a , в большей степени наблюдается в сечениях, близких к границе раздела торф – атмосфера. На больших глубинах, концентрация a уменьшается еще медленнее. Это объясняется тем, что высокочастотные (суточные) колебания сосредоточены на поверхности и быстро затухают, не оказывая существенного влияния на внутренний объем слоя торфа [8].

Стоит отметить, что при увеличении амплитуды колебаний T_a и постоянной толщине торфяного слоя h_t происходит уменьшение времени индукции. Аналогичная тенденция наблюдается при увеличении h_t , но при постоянной амплитуде колебаний температуры.

Заключение

Результаты расчетов, проведенных в заданном интервале параметров процесса, позволяют сделать следующие выводы:

1. На период индукции при самовоспламенении торфа основное влияние оказывают сезонные (годовые) колебания температуры.
2. Суточные колебания, в рассмотренном диапазоне, не оказывают достаточного влияния, вследствие их скоротечности и небольшой глубины проникновения внутрь слоя торфа.
3. Накопление тепла в слое торфа происходит достаточно медленно и периоды индукции теплового самовоспламенения могут достигать нескольких лет. Это следует учитывать при прогнозировании возможности возникновения торфяных пожаров.

Авторы признательны профессору А.А. Глазунову за интерес к данной работе и полезные дискуссии.

ЛИТЕРАТУРА

1. Мержанов А.Г., Барзыкин В.В., Абрамов В.Г. Теория теплового взрыва: от Н.Н. Семёнова до наших дней // Хим. физика. 1996. Т. 15. № 6. С. 3–44.
2. Струнина А.Г., Абрамов В.Т., Мержанов А.Г. // Физика горения и взрыва. 1966. Т. 2. № 2. С. 200.
3. Рубцов Ю.И., Казаков А.И., Дьяков А.П. и др. // Кинетика тепловыделения при низкотемпературном окислении и деструкции торфа. // Химия твердого топлива. 2001. № 6. С. 44–55.
4. Shteinberg A.S., Gorelski V.A., Viljoen H.J. et al. // Proc. V Intern. Conf. "Wildlife Fires". Tomsk: Publ. House Tomsk Univ., 2003. P. 304–305.
5. Штейнберг А.С., Худяев С.И. Тепловой взрыв при наличии колебаний температуры среды, окружающей реакционную смесь // ДАН. 2005. Т. 403. № 2. С. 1–4.
6. Горельский В.А., Яцук А.А., Штейнберг А.С. Тепловой взрыв при наличии колебаний температуры среды, окружающей реакционную смесь // Хим. физика. 2010. Т. 29. № 9. С. 37–41.
7. Adler J., Barry P.A., Bernal M.J.M. // Thermal Explosion Theory for a Slab with Time-Periodic Surface Temperature Variation // Proc. Royal Society of London. Series A, Mathematical and Physical Sciences. Mar. 12, 1980. V. 370. No. 1740. P. 73–88.
8. Zhil'tsov K.N., Shteinberg A.S., Gorelski V.A., Yashchuk A.A. Time of induction of thermal explosion in the presence of temperature variations of medium // Intern. Conf. on Devoted to the 80th Birthday of Academician A.G. Merzhanov, Book of Abstracts. Chernogolovka: ISMMSSC, 2011. P. 142–143.
9. Гришин А.М. О математическом моделировании торфяных пожаров // Вестник Томского государственного университета. Математика и механика. 2008. № 3(4). С. 85–95.
10. Гришин А.М. О математическом моделировании природных пожаров и катастроф // Вестник Томского государственного университета. Математика и механика. 2008. № 2(3). С. 105–114.
11. Стрыгин Н.Н. Исследование процессов и факторов самонагрева торфа // Труды ВНИИ торфяной промышленности / ред. С.С. Стрелков. Вып. 16. Госэнергоиздат, 1958. 240 с.
12. Горельский В.А., Жильцов К.Н., Яцук А.А. Математическое моделирование возникновения торфяных пожаров с использованием метода конечных элементов // IV Сибирская конференция по параллельным и высокопроизводительным вычислениям: тез. докл. Томск, 2011. С. 23–24.

Статья поступила 02.09.2011 г.

Gorel'skii V. A., Zhil'tsov K.N. INVESTIGATION OF PEAT IGNITION DUE TO TEMPERATURE FLUCTUATIONS. The problem of the onset thermal explosion in the peat-soil as affected by time-periodic ambient temperature variations with chemical reactions has been investigated. The main purpose of the investigation was to examine the degree of the influence of annual and daily temperature fluctuations on the occurrence of thermal explosion.

Keywords: auto-ignition, peat-soil, temperature fluctuations

GORELSKIY Vasiliy Alexceevich

(Research Institute of Applied Mathematics and Mechanics of Tomsk State University)

E-mail: vassili@mail2000.ru

ZHILTSOV Konstantin Nikolaevich

(Research Institute of Applied Mathematics and Mechanics of Tomsk State University)

E-mail: konstantin@niipmm.tsu.ru