

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ И МОДЕЛИРОВАНИЕ САМОВОЗГОРАНИЯ ТОРФЯНЫХ ПОЧВ

Н.Н. ДУБЕНОК, д. с.-х. н.; А.В. ЕВГРАФОВ, к.т.н.

(Кафедра мелиорации и геодезии)

В статье приведены результаты экспериментальных исследований по самовозгоранию торфяной почвы и предложена математическая модель, которая может быть использована для составления прогнозных расчетов.

Скорость тепловыделения с повышением температуры растет в геометрической прогрессии, а теплоотвод — по прямой пропорциональности. В результате наложения двух процессов возникают критические условия, при которых скорости теплоотвода и тепловыделения становятся равными, и за счет разбаланса скоростей тепловыделения и теплоотвода наблюдается самоускоряющийся саморазогрев, ведущий к возникновению горения.

При саморазогреве тела теплота передается в окружающую среду через поверхность площадью F м². Через эту поверхность в единицу времени отводится количество теплоты Q' , которое экспериментально было получено Ньютоном и записывается в виде уравнения [4]:

$$Q' = \alpha \cdot F \cdot \Delta T, \quad (1)$$

где α — коэффициент пропорциональности, называемый коэффициентом теплоотдачи Вт м⁻² К⁻¹; ΔT — разность температур поверхности тела и окружающей среды.

Данное уравнение, описывающее теплоотвод, является линейным.

Самовозгорание органических материалов вызывается за счет окисления атмосферным воздухом. Окислительные процессы экзотермичны, что сопровождается накоплением теплоты в реагирующей массе и самоускорением процесса.

Целью проведения экспериментальных исследований являлось определение зависимости самовозгорания образцов торфа от их влажности и плотности. По результатам были построены графики изменения температуры в центре и на поверхности исследуемых образцов торфа (рис. 1). Для проведения опытов использовался сушильный шкаф марки СНОЛ-3,5 с объемом рабочей камеры 40 л. Исследуемые образцы торфа помещали в контейнер К-30 цилиндрической формы, изготовленный из латунной сетки №8 с высотой и диаметром 30 мм без проволочного каркаса. Температуру в сушильном шкафу измеряли в нескольких точках тремя термопарами ТПК 011-0,5/1. Для записи показаний термопар использовался измеритель-регистратор марки ИС-203.4 четырехканальный, к которому через нормирующие усилители НУ-02 присоединяли термопары ТПК 011-0,5/1,5. Измеритель-регистратор ИС-203.4 через модуль ПС-2 и разъем RS-485 передавал данные с термопар на персональный компьютер, которые с помощью программ Dispatcher 203 и Techno Graphics обрабатывались.

На рисунке 1 показан процесс разогрева теплофизического центра и поверхности образцов торфа до точки 2, характеризующей равенство температур теплофизического центра и поверхности торфа и окружающего воздуха. Значения температур в данной точке

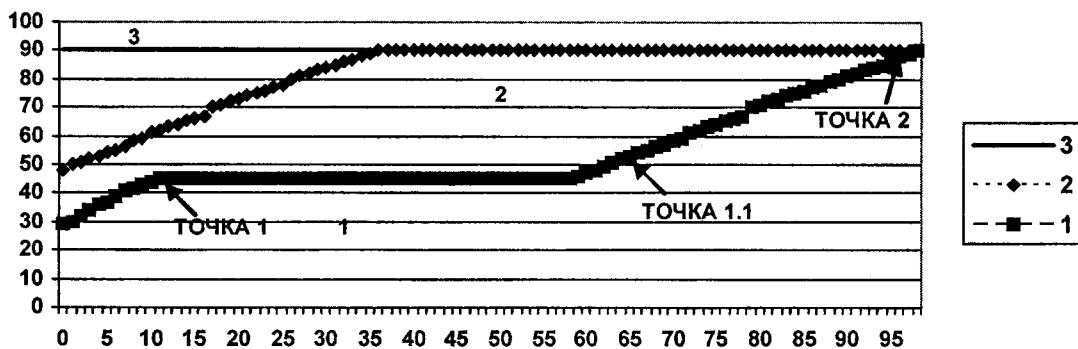


Рис. 1. Кривые разогрева образцов торфа. 1 — теплофизический центр, 2 — поверхность торфа, 3 — температура в сушильном шкафу

являются крайними перед началом реакции окисления торфа, которая развивается быстро и ее невозможно смоделировать, что подтверждается рядом авторов. Поэтому основной интерес представляет процесс разогрева образцов торфа до характерной точки 2.

Повышение температуры теплофизического центра до характерной точки 2 можно разбить на три участка. Первый участок заключен между началом кривой 1 и характерной точкой 1. Температура в точке 1 равна половине температуры воздуха в сушильном шкафу, и в нашем случае составляет 45°C. В точке 1 была определена влажность образцов торфа, значения которой представлены в таблице 1. Второй участок, расположенный между точкой 1 и точкой 1.1 на кривой 1, представляет собой прямолинейный участок, характеризующийся температурой, равной половине температуры воздуха в сушильном шкафу, т.е. 45°C. В точке 1.1 была определена влажность образцов при указанной выше их плот-

ности, которая составила 0%, значения влажности в характерных точках при температуре воздуха в сушильном шкафу представлены в таблице 1. Третий участок расположен между точками 1 и 2. Данный участок характеризуется дальнейшим повышением температуры теплофизического центра образцов торфа при их влажности 0% до достижения в характерной точке 2 температуры, равной температуре воздуха в сушильном шкафу 90°C.

Температурная кривая 2 поверхности образцов торфа характеризуется двумя участками. Первый участок — это наклонная линия от начала эксперимента до достижения значения 45°C, второй участок — это прямолинейная линия в продолжение первого участка с температурой 45°C до характерной точки 2 (см. рис. 1).

При наличии влажности в образцах торфа температура теплофизического центра не поднимается выше значения, равного половине статированной температуры воздуха. При полном обезво-

Таблица 1

Значения влажности образцов торфа в характерных точках температурной кривой теплофизического центра

Объемная плотность торфа, г/см ³	Начальная влажность, $W_{н12}$ %	Влажность в точке 1, %	Влажность в точке 1.1, %	Интенсивность испарения влаги U , г/мин
0,16	65,2	52,9	0	0,039
0,18	66,2	55,4	0	0,021

живании торфа и начинается повышение температуры теплофизического центра.

Согласно результатом экспериментальных исследований (см. рис. 1) процесс самовозгорания можно описать системой из 4 уравнений, представленных далее.

Рассмотрим первое уравнение для описания процесса нагрева поверхности торфяной почвы до температуры воздуха в сушильном шкафу. Уравнение представлено в общем виде:

$$T_{\Pi} = T_{\Pi}^H + \Delta T_{\Pi}, \quad (2)$$

где T_{Π} — температура поверхности в °С торфа на интересующий момент времени; T_{Π}^H — начальная температура поверхности торфа в °С, которая задается или определяется экспериментальным путем; ΔT_{Π} — приращение температуры поверхности торфа в °С за определенный интервал времени.

Фактически ΔT_{Π} есть функция, зависящая от следующих параметров, которые были определены в результате проведения экспериментальных исследований, что также подтверждается рядом авторов [1–8];

$$\Delta T_{\Pi} = f(\Delta \tau_{\Pi}, d_v, F, V, T_{\text{ОКР}}), \quad (3)$$

где $\Delta \tau_{\Pi}$ — изменение по времени, или определенный интервал времени в минутах для поверхности торфяной почвы; d_v — объемная или насыпная плотность торфа в г/см³; F — площадь поверхности торфа, контактирующей с окружающим воздухом в см²; V — объем торфа, подвергающийся тепловому воздействию в см³; $T_{\text{ОКР}}$ — температура окружающего воздуха в °С.

Нами было предложено уравнение.

$$\Delta T_{\Pi} = \Delta \tau_{\Pi} \cdot \left(d_v \cdot \frac{F}{V} \cdot T_{\text{ОКР}} \right)^{1/2}. \quad (4)$$

Данное уравнение является зависимостью линейного типа. Как уже отмечалось ранее, процессы нагрева являются линейными, и их нелинейность является кажущейся, что видно из

проведенных исследований и подтверждается рядом авторов [1–7]. Уравнение (4) учитывает все физические параметры, влияющие на процесс нагрева торфа, о которых говорилось ранее. Следует отметить, что соотношение

$\frac{F}{V}$ характеризует размер и скопление торфяной почвы. Запишем уравнение (2) с учетом уравнения (4):

$$T_{\Pi} = T_{\Pi}^H + \Delta \tau_{\Pi} \cdot \left(d_v \cdot \frac{F}{V} \cdot T_{\text{ОКР}} \right)^{1/2}. \quad (5)$$

Преобразуем уравнение (4) и выразим из него $\Delta \tau_{\Pi}$:

$$\Delta \tau_{\Pi} = \frac{T_{\Pi} - T_{\Pi}^H}{\left(d_v \cdot \frac{F}{V} \cdot T_{\text{ОКР}} \right)^{1/2}}. \quad (6)$$

Учитывая, что уравнения (5) и (6) моделируют процесс нагрева поверхности торфа до температуры воздуха в сушильном шкафу, то $T_{\Pi} = T_{\text{ОКР}}$ и уравнение (5) можно записать в следующем виде:

$$\Delta \tau_{\Pi} = \frac{T_{\text{ОКР}} - T_{\Pi}^H}{\left(d_v \cdot \frac{F}{V} \cdot T_{\text{ОКР}} \right)^{1/2}}. \quad (7)$$

По уравнению (7) выполнен расчет температуры поверхности торфяной почвы, результаты расчета были сравнены с результатами экспериментальных исследований, которые дали не менее девяти повторений из десяти измерений (табл. 2). В процессе расчетов параметры уравнения (7) задавались следующим образом: F , V , d_v , T_{Π}^H , $T_{\text{ОКР}}$ определяли из результатов экспериментальных исследований. Далее полученное расчетное значение $\Delta \tau_{\Pi}$ сравнивали с экспериментальным значением и определяли процент расхождения между ними. Из анализа данных таблицы 2 видно, что предложенное уравнение (7) позволяет производить расчеты с достаточной степенью точности, что даст возможность использовать его для прогноза возник-

Таблица 2

Сравнение результатов экспериментальных исследований и математического моделирования по уравнению (7)

Объемная плотность торфа d_v , г/см ³	Температура воздуха в сушильном шкафу $T_{ОКР}$, °С	$\Delta T_{П}$, полученное опытным путем, мин	$\Delta T_{П}$, полученное расчетным путем, мин	Температура поверхности торфа $T_{П}$, °С	Расхождение значений $\Delta T_{П}$ расчетных и опытных, %
0,16	90	36	33,8	90	6,1
0,18	90	41	41	90	0

новения процесса самовозгорания торфяной почвы.

Второе уравнение моделирует теплофизический процесс нагрева центра исследуемого торфяного слоя до характерной точки 1. В общем уравнение имеет вид:

$$T_{ц1} = T_{цн1} + \Delta T_{ц1}, \quad (8)$$

где $T_{ц1}$ — температура теплофизического центра торфяного слоя в точке 1, °С; $T_{цн1}$ — начальная температура теплофизического центра торфяного слоя, °С, задавалась по результатам экспериментальных исследований; $\Delta T_{ц1}$ — приращение температуры теплофизического центра торфяного слоя, °С за интервал времени.

В результате проведенных экспериментальных исследований было установлено, что $\Delta T_{ц1}$ зависит от следующих параметров:

$$\Delta T_{ц1} = f(\Delta \tau_1, d_v, F, V, T_{ОКР}, U) \quad (9)$$

где $\Delta \tau_1$ — временной интервал в минутах достижения температуры теплофизического центра торфяного слоя почвы характерной точки 1.

Таким образом, изменение температуры в теплофизическом центре торфяной почвы зависело не только от $\Delta \tau_1, d_v, F, V, T_{ОКР}$, но и от влажности образца, которая изменялась с течением времени. Изменение влажности образца учитывалось через интенсивность испарения влаги U из него, которая зависела от плотности образца, статированной температурой в сушильном шкафу, и начальной влажности торфяной почвы (см. табл. 1). Запишем

уравнение (8) с учетом вышесказанного:

$$T_{ц1} = T_{цн1} + \Delta \tau_1 \cdot \left(d_v \cdot \frac{F}{V} \cdot T_{ОКР} \right)^{U \cdot F}. \quad (10)$$

Учитывая, что температура в центре теплофизического центра торфяной почвы в точке 1 равна половине температуры, статированной в сушильном шкафу, т.е. выполняется условие

$T_{ц1} = \frac{1}{2} \cdot T_{ОКР}$, уравнение (10) можно записать в следующем виде, выразив из него $\Delta \tau_1$:

$$\Delta \tau_1 = \frac{\frac{1}{2} \cdot T_{ОКР} - T_{цн1}}{\left(d_v \cdot \frac{F}{V} \cdot T_{ОКР} \right)^{U \cdot F}}. \quad (11)$$

По уравнению (11) выполнен расчет, а его результаты были сравнены с результатами экспериментальных исследований (табл. 3). Из анализа данных таблицы 3 видно, что расчет по уравнению (11) достаточно точен, максимальное расхождение между расчетными и экспериментальными данными составляет 6,5%, данное уравнение пригодно для практического использования в целях прогнозирования.

Рассмотрим третье уравнение, моделирующее временной интервал прямолинейного участка температуры теплофизического центра торфяной почвы при значении $\frac{1}{2} \cdot T_{ОКР}$ между характерными точками 1 и 1.1. Данный участ

Таблица 3

Сравнение результатов экспериментальных исследований и математического моделирования по уравнению (11)

Объемная плотность торфа d_v , г/см ³	Температура воздуха в сушильном шкафу T_{OKP} , °C	$\Delta\tau_1$, полученное опытным путем, мин	$\Delta\tau_1$, полученное расчетным путем, мин	Температура $T_{ц1}$, °C	U , г/мин	Расхождение значений $\Delta\tau_1$ расчетных и опытных, %
0,16	90	11	10,4	45	0,039	5,5
0,18	90	20	18,7	45	0,021	6,5

ток характеризуется тем, что в конечной точке 1.1 влажность слоя торфяной почвы равняется 0%. Уравнение представлено в следующем виде:

$$\Delta\tau_{1.1} = \frac{m_{BH} - \Delta\tau_1 \cdot U}{U}, \quad (12)$$

где $\Delta\tau_{1.1}$ — интервал времени в минутах между характерной точкой 1 и точкой 1.1; m_{BH} — стартовая или начальная масса воды в образце торфяной почвы в граммах.

В таблице 4 приведены результаты расчета по уравнению (12) и экспериментальных исследований, из которых видно, что данное уравнение пригодное для проведения прогнозных расчетов, причем в уравнение подставлялись значения $\Delta\tau_1$, полученные расчетным путем из таблицы 3. Таким образом, можно считать, что приведенная погрешность вычислений в таблице 4 является суммарной для уравнений (11) и (12).

Таблица 4

Результаты экспериментальных исследований и моделирования по уравнению (12)

Объемная плотность торфа d_v , г/см ³	Температура воздуха в сушильном шкафу T_{OKP} , °C	$\Delta\tau_{1.1}$, полученное опытным путем, мин	$\Delta\tau_{1.1}$, полученное расчетным путем, мин	m_{BH} , г	U , г/мин	Расхождение значений $\Delta\tau_1$ расчетных и опытных, %
0,16	90	47	46,5	2,22	0,039	1,1
0,18	90	102	102,2	2,54	0,021	0,2

Четвертое уравнение моделирует изменение температуры теплофизического центра от характерной точки 1.1 до характерной точки 2:

$$T_{ц2} = T_{цн2} + \Delta T_{ц2}, \quad (13)$$

где $T_{ц2}$ — температура теплофизического центра торфяного слоя в точке 2, °C, численно равная T_{OKP} ; $T_{цн2}$ — начальная температура теплофизического центра торфяного слоя, °C для расчета точки 2, численно равная $1/2 T_{OKP}$; $\Delta T_{ц2}$ — приращение температуры теплофизического центра торфяного слоя, °C за интервал времени.

При разогреве теплофизического центра торфяного слоя на температурном участке от точки 1 до точки 2 преобладают процессы самонагрева

материала, которые носят окислительный химический характер. Влажность материала на рассматриваемом участке равна 0%, таким образом она не участвует в процессе самонагрева, как в предыдущем уравнении.

С учетом вышесказанного для расчета $\Delta T_{ц2}$ было предложено уравнение:

$$\Delta T_{ц2} = \Delta\tau_2 \cdot \left(d_v \cdot \frac{F}{V} \cdot T_{OKP} \right)^{\delta^*}, \quad (14)$$

где $\Delta\tau_2$ — временной интервал в минутах теплофизического центра слоя торфяной почвы между точками 1 и 2; m — масса абсолютно сухой торфяной почвы, или масса реагирующего вещества, г; δ^* — критерий Фран-

ка-Каменецкого для некритических условий самовозгорания определяется по таблицам, по известным E и T_{OKP} .

Преобразуем уравнение (14), выразив Δt_2 с учетом равенства

$$\Delta T_{ц2} = T_{OKP} - \frac{1}{2} \cdot T_{OKP}$$

$$\Delta t_2 = \frac{T_{OKP} - \frac{1}{2} \cdot T_{OKP}}{\left(d_v \cdot \frac{F}{V} \cdot T_{OKP} \right)^{\frac{\delta^*_{\infty}}{m}}} \quad (15)$$

По уравнению (15) был выполнен расчет Δt_2 , результаты которого при-

ведены в таблице 5. Из сравнения экспериментальных и расчетных данных по Δt_2 , приведенных в таблице 5, видно, что расхождение между ними находится в допустимых пределах. Из приведенных уравнений для определения времени достижения характерной точки 2 основными являются уравнения (11), (12) и (15).

В таблице 6 представлено сравнение экспериментальных и расчетных данных общего времени от начала нагрева образцов торфа до достижения точки 2, из которого видно, что максимальное расхождение между ними составляет 3,4%.

Таблица 5

Сравнение результатов экспериментальных исследований и математического моделирования по уравнению (15)

Объемная плотность торфа d_v , г/см ³	Температура воздуха в сушильном шкафу T_{OKP} , °C	Δt_2 , полученное опытным путем, мин	Δt_2 , полученное расчетным путем, мин	$\Delta \delta_{*}$ для не критических условий	m , г	Расхождение значений Δt_2 расчетных и опытных, %
0,16	90	40	37,8	0,38	3,41	5,5
0,18	90	41	38	0,38	3,83	7,3

Таблица 6

Итоговая точность моделирования по уравнениям (11), (12) и (15)

Объемная плотность торфа d_v , г/см ³	Температура воздуха в сушильном шкафу T_{OKP} , °C	Суммарное время от начала эксперимента до точки 2, мин	Суммарное расчетное время от начала расчета до точки 2, мин	Расхождение значений расчетных и опытных, %
0,16	90	98	94,7	3,4
0,18	90	162	158,9	1,9

Эффект самовозгорания торфяной почвы возможен при полном ее обезвоживании, что видно из графика (см. рис. 1) и таблицы 1, поскольку большая часть энергии разогрева уходит на испарение влаги, при этом не происходит нарушения теплового баланса в сторону саморазогрева и окисления.

Разработанная модель пригодна для прогнозирования пожарной обстановки на торфяниках, что подтверждается сравнением экспериментальных данных и результатов расчета. Расхож-

дение опытных и расчетных данных составляет 3,4% (см. табл. 6), что говорит о возможности ее использования для практических целей.

Библиографический список

1. Вант Гофф Я.Г. Очерки по химической динамике. М.: ОНТИ Химтеорет, 1936. — 2. Веселовский В.С. Самовозгорание промышленных материалов. М.: Наука, 1964. — 3. Драйздел Д. Введение в динамику пожаров / Пер. с англ. К.Г. Бомштейна. Под ред. Ю.А. Кошмарова и В.Е. Макарова. М.: Стройиздат, 1990. —

4. Дубенок, Н.Н. Эффективность осушения земель / Н.Н. Дубенок, П.А. Волковский, К.С. Крутилин : Сб. науч. тр. ТСХА. М. 1989. С. 74-77. — 5. Киселев Я.С. Физические модели горения в системе предупреждения пожаров: монография Санкт-Петербургский университет МВД России, 2000. — 6. Корсолоу Г. Теплопроводность твердых тел. М.:

Наука, 1964. — 7. Пат. № 67872 Российская Федерация, (51) МПК А62С 3/00, А62С 2/00. Система мониторинга температурного состояния торфяника / Н.Н. Дубенок, А.В. Евграфов; патентообладатель — Евграфов А.В.; опубл. 10.11.2007. Бюл. № 31. — 8. Франк-Каменецкий Д.А. Диффузия и теплопередача в химической кинетики. М.: Наука, 1967.

Рецензент — д. с.-х. н. В.А. Черников

SUMMARY

Results of experimental research into self-ignition of peaty soil are cited in this article, mathematical model that can be used in prognostication calculations has been drawn up besides.