

*К.І. Мигаленко, канд. техн. наук
(ЧПБ ім. Героїв Чорнобиля НУЦЗ України)*

МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ТЕПЛООВОГО ВПЛИВУ ПОЖЕЖІ НА ШТАБЕЛІ ТОРФУ ПРИ ЇХ ЗБЕРІГАННІ

Проаналізовано зберігання торфу на підприємствах, визначені основні небезпечні фактори, розглянуті варіанти розвитку пожеж на штабелях. Досліджено вплив геометричних параметрів форми штабеля на час досягнення небезпечної температури на його поверхні за допомогою спеціальних програмних комплексів. Виконане математичне моделювання теплового впливу пожежі на штабелі торфу при їх зберіганні.

Ключові слова: торф'яні поля, штабелі торфу, пожежна безпека, сценарії пожежі, теплове випромінювання.

К.І. Мигаленко

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕПЛООВОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ ПОЖАРА НА ШТАБЕЛИ ТОРФА ПРИ ИХ ХРАНЕНИИ

Проанализировано хранение торфа на предприятиях, определены основные опасные факторы, рассмотрены варианты развития пожаров на штабелях. Исследовано влияния геометрических параметров формы штабеля на время достижения опасной температуры на его поверхности с помощью специальных программных комплексов. Сделано математическое моделирование теплового воздействия пожара на штабелі торфа при их хранении.

Ключевые слова: торфяные поля, штабелі торфа, пожарная безопасность, сценарии пожара, тепловое излучение.

К. І. Mygalenko

MATHEMATICAL MODELING OF THERMAL EFFECTS OF FIRE ON A PILE OF PEAT DURING THEIR STORAGE

Peat storage on enterprises was analyzed main risk factors were defined, the variants of fire development on peat piles were discussed. The influence of geometrical parameters on the stack form time to reach a dangerous temperature on its surface using special software systems. Mathematical modeling of thermal effects of the fire on the peat piles during their storage was made.

Keywords: peat fields, peat stacks, fire safety, fire scenarios, thermal radiation.

Актуальність. В період енергетичної кризи, перспективним напрямком є використання торфу в якості палива. В Україні загальна площа торфовищ і земель із торфовим ґрунтом, включаючи деградовані торфовища, становить 0,9 млн. га.

Торфовиробництво є пожежо- та вибухонебезпечним. Основним джерелом вибухонебезпеки при роботі, наприклад, брикетного заводу є торфовий пил, а пожежної небезпеки – зберігання в штабелях.

Мета. Виконати математичне моделювання теплового впливу пожежі на штабелі торфу при їх зберіганні.

При зберіганні торфу на підприємстві, що використовує його у якості палива, найбільш небезпечним вважається фрезерний торф, тобто торф, який був видобутий з торфовища шляхом вирізання його із пласта спеціальними фрезами [1, 2]. Щодо умов зберігання торфу у штабелях та караванах, існують рекомендації [1, 2]. Згідно із ними штабель, у якому зберігається торф повинен мати правильну геометричну форму з відповідним ухилом для стікання атмосферної вологи. Найбільш поширені геометричні форми штабелів фрезерного торфу представлені на рисунку 1.

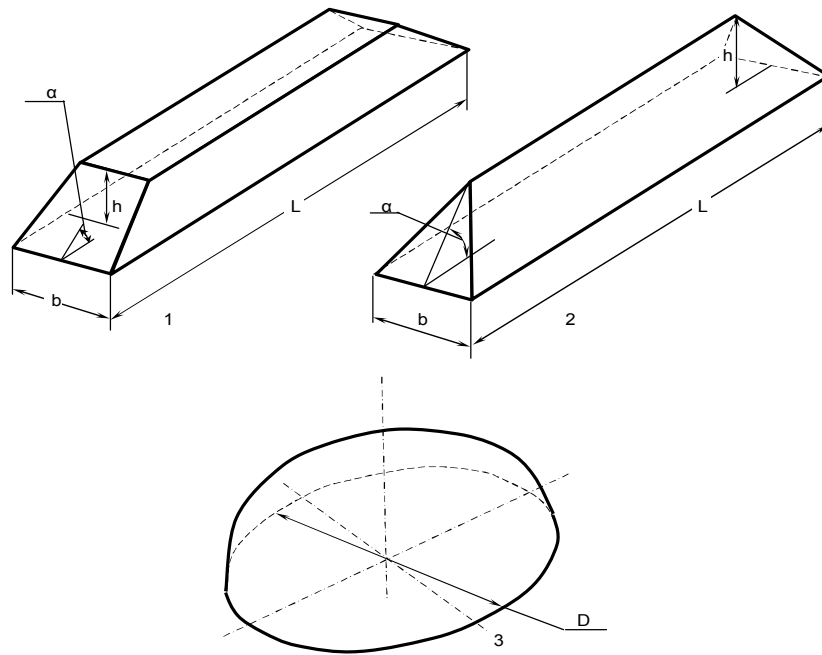


Рисунок 1 – Типи геометричних конфігурацій штабелів торфу при його зберіганні на підприємствах, де його використовують у якості палива:
 1 – зрізана піраміда; 2 – піраміда; 3 – напівсфера

Згідно зі всіма протипожежними інструкціями [1, 2], геометричні розміри штабелів та параметри їх розташування зведені до таблиці 1.

Таблиця 1

Розміри штабелів торфу різної геометричної конфігурації при їх зберіганні на складах підприємств, де його використовують у якості палива

Тип геометрії штабеля	Висота, м		Ширина, м		Довжина, м		Кут нахилу, °		Діаметр, м	
	Макси-мальна	Реко-мендована	Макси-мальна	Реко-мендована	Макси-мальна	Реко-мендована	Макси-мальний	Реко-мендований	Макси-мальний	Реко-мендований
Зрізана прям. пірам.	7	2,5	20	20	30	20	80	60	-	-
Прямокутна піраміда	7	3	30	20	30	20	80	60	-	-
Напівсфера	-	-	-	-	-	-	-	-	20	10

Важливим параметром для моделювання температурного впливу пожежі є протипожежний розрив між штабелями. Згідно з багатьма рекомендаціями, мінімальний протипожежний розрив становить 5 м. В рекомендаціях [1, 2] наведена схема взаємного розташування штабелів, згідно з якою їх треба розташовувати по два штабелі, зберігаючи при цьому протипожежні розриви. Таким чином, можливі три сценарії пожежі на складі, де зберігається торф.

Постановка задачі. Для вирішення поставлених нами задач щодо прогнозування поведінки системи, що складається з торфового штабеля, охопленого пожежею та штабеля торфу без пожежі, необхідна розробка математичного апарату для визначення температурних розподілів на поверхні штабеля без пожежі. Результатом прогнозування у цьому випадку є час, за який досягається температура займання у штабелі, не охопленому пожежею. Теплову задачу поширення тепла у описаній системі можна сформулювати з огляду на три можливі сценарії розвитку пожежі. Перший сценарій полягає у виникненні та розвитку пожежі у сусідньому штабелі, що знаходиться з боку одного з торців. Другий сценарій розвитку пожежі полягає у займанні в боковому штабелі. Третій сценарій передбачає розвиток пожежі у двох сусідніх штабелях.

Виклад основного матеріалу. Аналіз поставленої задачі показує, що вона є надто складною і потребує, у суворій постановці, залучення сумісного термогазодинамічного аналізу та аналізу теплопровідності, і крім цього необхідно замкнути записану систему рівнянь інтегральним рівнянням теплообміну випромінюванням. В такій постановці цю задачу вирішувати можна тільки чисельно із залученням спеціалізованих програмних комплексів, що поєднують у собі можливості проведення такого аналізу у сумісній постановці. Крім цього, така постановка задачі потребує залучення потужної комп'ютерної техніки. Щоб зробити розрахунок більш простим потрібно зробити декілька спрощувальних припущень. Ми пропонуємо ввести у модель такі положення: 1) пожежа у сусідньому штабелі є розвиненою і має форму факела із певною поверхнею та сталою усередненою температурою, яка становить 750 °С; 2) у випадку штабеля із конфігурацією у вигляді піраміди та зрізаної піраміди, поверхня факела є плоскою, а у випадку конфігурації напівсфери – поверхня факела є циліндричною; 3) теплофізичні властивості торфу можуть залежати від температури; 4) теплообмін між факелом та штабелем з огляду на те, що проміжок між штабелями добре вентилується, має тільки променисту складову, яка істотно преважує; 5) умовою спалахування і початку поширення пожежі у штабелі без пожежі є досягнення у відповідній розрахунковій області температури запалення.

На рис. 2-4 показані кінцево-елементні схеми розрахункових областей для трьох сценаріїв пожежі у штабелях, що мають геометричну конфігурацію піраміди, зрізаної піраміди та напівсфери.

При розгляді теплообміну між факелом пожежі та торфовим штабелем застосовуються граничні умови III роду, що відповідають закону Стефана-Больцмана [3 - 6].

Для розрахунку можна використати рівняння нестационарної теплопровідності.

Коефіцієнт теплообміну враховує дію інфрачервоного випромінювання і визначається за таким загальним рівнянням [3]:

$$\sum_{j=1}^N (\delta_{ij} - \varphi_{ij}) \sigma T_j^4 = \sum_{j=1}^N \frac{1}{A_j} \left(\frac{\delta_{ij}}{\varepsilon_j} - \varphi_{ij} \frac{1 - \varepsilon_i}{\varepsilon_j} \right) q_j \quad (1)$$

де δ_{ij} – параметр, який дорівнює 0, якщо $i \neq j$, і дорівнює 1, якщо $i = j$; q_j – поверхневий тепловий потік через i -ту поверхню, яка обмінюється випромінюванням з j -тою поверхнею; A_j – площа j -тої елементарної площі поверхні, що здійснює елементарний теплообмін; φ_{ij} – променеві форм-фактори, залежні від взаємного розташування i -тої і j -тої площ поверхонь, які обмінюються випромінюванням, і визначаються за формулою:

$$\varphi_{ij} = \frac{1}{A_i} \int_{A_i} \int_{A_j} \frac{\cos \theta_i \cos \theta_j}{\pi r^2} dA_j dA_i. \quad (2)$$

У формулі (4) використовуються такі величини:

θ – кут між нормаллю до елемента і лінією, яка з'єднує елементи i та j ;

r – відстань між центрами елементів i та j .

Початкові дані, що використовуються, згідно з [6], для розрахунків зведені до таблиці 2.

Таблиця 2

Початкові дані до розрахунку температурного розподілу у системі торфовий штабель – факел пожежі

Початкова температура штабеля, °С	Температура оточуючого повітря, °С	Температура запалення торфу, °С	Температура факелу торфової пожежі, °С	Ступінь чорноти поверхні штабеля	Ступінь чорноти факела
20	20	225	720	0,9	1

Теплофізичні властивості торфу можна прийняти, згідно з рекомендаціями [5]. Згідно із цими рекомендаціями, прийняті теплофізичні характеристики подані у таблиці 3 (де W – вологість торфу, %).

Таблиця 3

Теплофізичні характеристики торфу

Коефіцієнт теплопровідності, $\lambda(T)$, Вт/(м·°С)	Питома теплоємність, $c_p(T)$, Дж/(кг·°С)	Густина, кг/м ³
Теплофізичні характеристики торфу		
$\lambda = (0,585 - 0,495W + 0,987W^2) T^{0,2}$	$c_p = (765,0 - 1577,8W) \times \exp[(0,64 \cdot 10^{-3} + 0,0175W)T]$	400

Рівняння нестационарної теплопровідності разом із рівняннями (1) та (2) для цього випадку не має аналітичних розв'язків і може бути вирішене тільки чисельно [3 - 6]. Для його розв'язку нами був використаний метод кінцевих елементів [7-8].

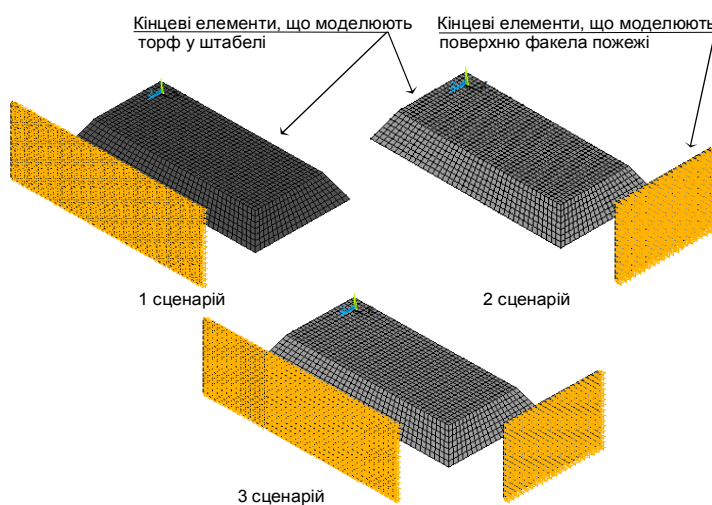


Рисунок 2 – Кінцево-елементні схеми теплової взаємодії між факелом та торфовим штабелем у вигляді зрізаної піраміди

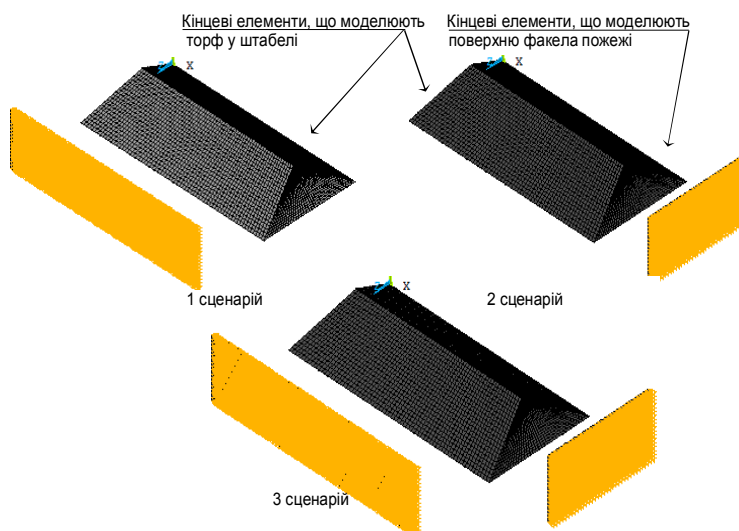


Рисунок 3 – Кінцево-елементні схеми теплової взаємодії між факелом та торфовим штабелем у вигляді чотирикутної піраміди

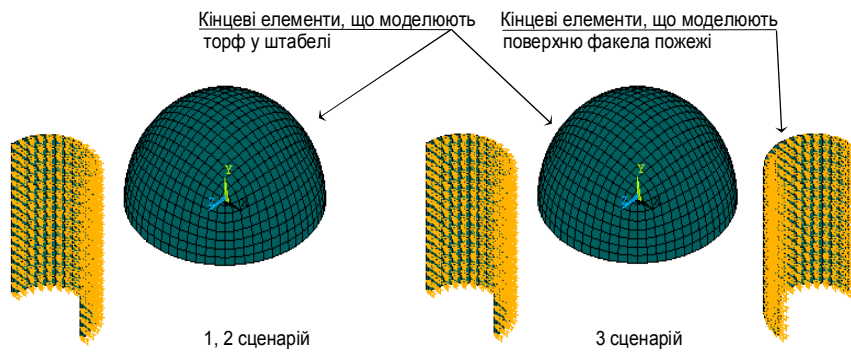


Рисунок 4 – Кінцево-елементні схеми теплової взаємодії між факелом та торфовим штабелем у вигляді напівсфери

Використовуючи вищевказаний математичний апарат, нами була розроблена розрахункова методика для реалізації сформульованих умов. Згідно із цією методикою розрахунок проводиться з використанням таких процедур.

1. Будується геометрична модель з прикладанням ГУ, відповідно до рисунка 1.
2. Організовується цикл, в ході якого змінюється час впливу пожежі.
3. Розрахунок продовжується до тих пір, поки температура в будь-якій точці захищеної ділянки торфового штабеля не досягає температури займання торфу.
4. Розрахунок повторюється для штабеля з іншими геометричними параметрами.

Для реалізації такого алгоритму були створені кінцево-елементні схеми, які наведені на рисунках 2 – 4. При реалізації обчислювального процесу були прийняті параметри алгоритму чисельного інтегрування.

Використовуючи вищеописаний математичний апарат, були отримані результати. Якісна картина температурних розподілів у різні моменти часу для різних сценаріїв пожежі наведена на рисунках 5 – 10.

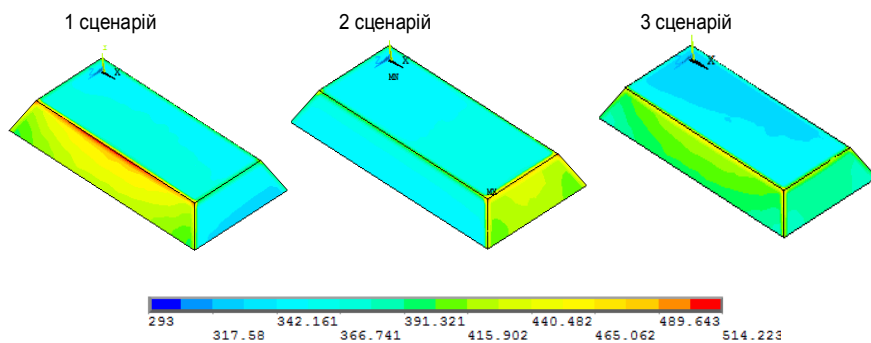


Рисунок 5 – Розподілення температури (K) на поверхні штабелю торфу у формі зрізаної піраміди на 10 хв розвитку пожежі

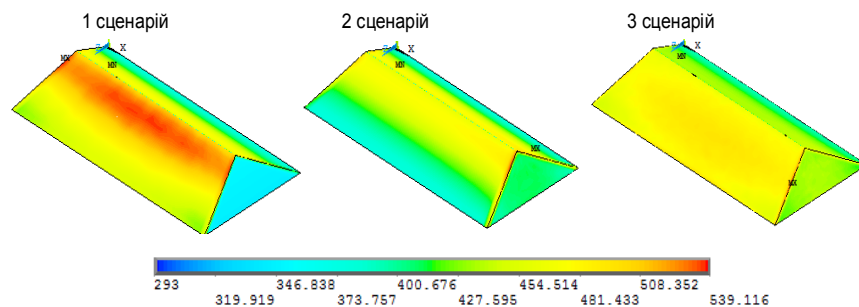


Рисунок 6 – Розподілення температури (K) на поверхні штабелю торфу у формі чотирикутної піраміди на 10 хв розвитку пожежі

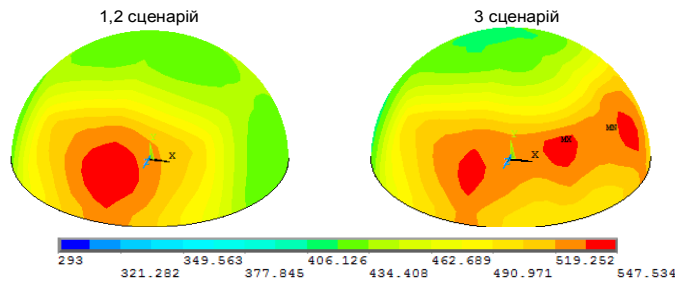


Рисунок 7 – Розподілення температури (K) на поверхні штабелю торфу у формі напівсфери на 20 хв розвитку пожежі

Аналіз температурних розподілів, поданих на вказаних рисунках показує, що найбільш небезпечним є 3-й сценарій, коли пожежа відбувається з двох боків штабеля.

Якщо порівнювати час настання небезпечної температури займання на поверхні торфового штабеля, можна зазначити, що найскоріше така температура настає на поверхні штабеля із формою зрізаної піраміди. Трохи повільніше температура займання досягається на поверхні штабеля пірамідальної форми. Найбільш безпечною формою торфового штабеля є напівсфера, оскільки в цьому випадку температура займання досягається майже удвічі повільніше, аніж у перших двох випадках.

Точка з найбільшою температурою є незмінною для всіх сценаріїв пожежі. Для штабеля із формою зрізаної піраміди, точка на поверхні із найбільшою температурою є однією із її вершин, яка розташована ближче до поверхні факела. Точка із максимальною температурою розташована у вершинах штабеля пірамідальної форми.

Для сферичного штабеля точка з найбільшою температурою знаходиться біля середини між його вершиною та основою.

На рисунку 8 наведені графіки зміни максимальної температури на поверхні штабелів різної форми із рекомендованими розмірами (див. таблицю 1).

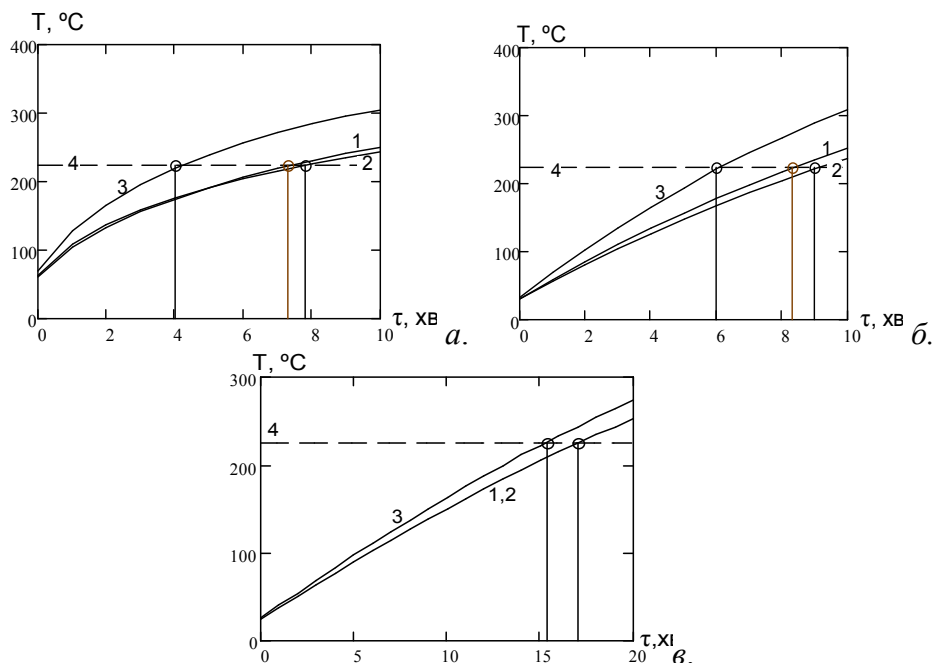


Рисунок 8 – Графіки зміни максимальної температури на поверхні штабелів різної форми із рекомендованими розмірами (1 – 1 сценарій пожежі, 2 – 2 сценарій пожежі, 3 – 3 сценарій пожежі): а – форма штабеля є зрізаною пірамідою; б – пірамідальна форма штабеля; в – форма є напівсферою

На рисунку 8 вертикальними лініями із маркерами позначений час досягнення небезпечної температури. Цифрами 1 – 3 позначені відповідні сценарії пожежі, а цифрою 4 позначений рівень небезпечної температури займання торфу (див. таблицю 2)

У таблиці 4 наведений час настання небезпечної температури на поверхні штабелів різної форми залежно від сценарію пожежі.

Таблиця 4

Час настання небезпечної температури на поверхні штабелів торфу різної геометричної форми при різних сценаріях пожежі

Геометрична форма торфового штабеля	Час настання небезпечної температури, хв		
	1 сценарій пожежі	2 сценарій пожежі	3 сценарій пожежі
Зрізана піраміда	7,3	7,8	4
Піраміда	8,3	9	6
Напівсфера	17		15,4

Дані таблиці 4 показують, час настання небезпечної температури на поверхні штабеля у формі зрізаної піраміди і на поверхні пірамідального штабеля майже не відрізняється.

Нами були проведені додаткові дослідження впливу геометричних параметрів форми штабеля на час досягнення небезпечної температури на його поверхні. Наші дослідження показали, що найбільш суттєвий вплив на час досягнення небезпечної температури для штабелів у формі пірамід має кут нахилу торцевих граней, а для сферичного штабеля – його діаметр основи.

Для виявлення впливу були побудовані відповідні графіки залежності часу настання небезпечної температури від відповідних геометричних параметрів, які варіювалися у межах інтервалів, що регламентовані даними, наведеними у таблиці 4. На рисунку 10 наведено графіки отриманих залежностей часу досягнення небезпечної температури на поверхні пірамідальних штабелів від кута нахилу торцевої грані до горизонтальної поверхні у результаті розрахунку із використанням запропонованої математичної моделі.

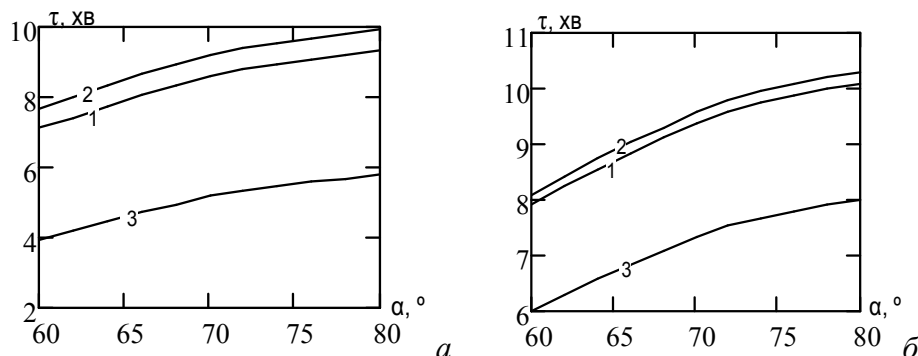


Рисунок 9 – Графіки залежностей часу досягнення небезпечної температури на поверхні пірамідальних штабелів від кута нахилу торцевої грані до горизонтальної поверхні (1 – 1 сценарій пожежі, 2 – 2 сценарій пожежі, 3 – 3 сценарій пожежі):
а – форма штабеля є зрізаною пірамідою; б – пірамідальна форма штабеля

Аналізуючи графіки на рисунку 10, можна помітити важливу особливість, що полягає у збільшенні часу досягнення небезпечної температури при збільшенні кута нахилу торцевих граней штабеля. Причому збільшення кута нахилу граней до максимально можливого значення може збільшити час настання небезпечної температури до 5-6 хв.

На рисунку 11 наведені побудовані графіки отриманих залежностей часу досягнення небезпечної температури на поверхні штабелів сферичної форми від діаметра основи штабеля у результаті розрахунку із використанням запропонованої математичної моделі.

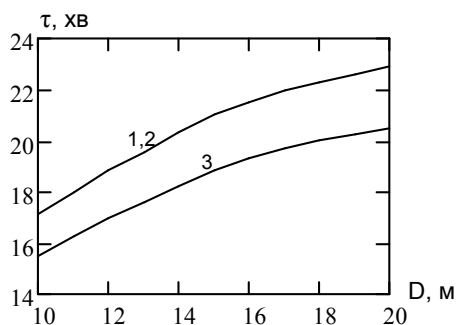


Рисунок 10 – Графіки залежностей часу досягнення небезпечної температури на поверхні штабелів сферичної форми від діаметра основи штабеля (1 – 1 сценарій пожежі, 2 – 2 сценарій пожежі, 3 – 3 сценарій пожежі)

Графіки на рисунку 10 показали, що при збільшенні діаметра основи сферичного штабеля можна суттєво збільшити час настання небезпечної температури на його поверхні. Так при збільшенні діаметра основи штабеля від рекомендованого до максимально можливого можна збільшити означений час на 4 хв.

Висновки:

1. Виконано математичне моделювання теплових процесів при пожежі на складі енергетичних підприємств, де торф зберігається у штабелях із залученням енергетичного рівняння променистого теплообміну та рівняння нестационарної теплопровідності, а також методу кінцевих елементів у результаті чого виявлені закономірності часу досягнення небезпечної температури на їх поверхні залежно від геометричної конфігурації штабеля та сценаріїв розвитку пожежі на сусідніх штабелях.

2. Виявлено, що найбільш безпечною формою штабеля є сферична форма, оскільки час досягнення небезпечної температури на поверхні штабеля такої форми із рекомендованими значеннями геометричних параметрів становить не менше 15 хв, тоді як найбільш небезпечною є форма штабеля у вигляді зрізаної піраміди, оскільки на поверхні штабеля такої форми із рекомендованими значеннями геометричних параметрів час спалахування становить лише 4 хв.

3. Виявлені закономірності залежностей часу досягнення небезпечної температури на поверхні пірамідальних штабелів у залежності від кута нахилу торцевих граней до горизонтальної поверхні та діаметра основи сферичних штабелів. Виявлено, що зміною значень вищевказаних параметрів у межах допустимих величин можна суттєво збільшити час досягнення небезпечної температури на поверхні торфових штабелів.

Список літератури

1. Картошкин М. Д. Хранение топлива на электростанциях. М. – Л.: Госэнергоиздат, 1961. – 208 с.
2. РД 34.44.101-96. Типовая инструкция по хранению углей, горючих сланцев и фрезерного торфа на открытых складах электростанций. – 1996 г.
3. Алифанов А.М. Обратные задачи теплообмена / Алифанов А.М. – М.: Машиностроение, 1988. – 280 с.
4. Ваничев А.П. Приближенный метод решения задач нестационарной теплопроводности при переменных константах / Ваничев А.П. – М.: АН СССР – ОН, 1946. – № 12. – С. 167–174.
5. Метод конечных элементов в механике твердых тел / [Сахаров А.С., Кислокий В.М., Киричевский В.В. и др.]; под ред. А.С. Сахарова, И.А. Альтенбаха. – К.: Вища школа, 1982. – 480 с.
6. ANSYS, ANSYS 9.0 Manual Set, ANSYS Inc., Southpoint, 275 Technology Drive, Canonsburg, PA 15317, USA.
7. Поршнева С.В. Численные методы на базе Mathcad / Поршнева С.В., Беленкова И.В. – СПб.: БХВ-Петербург, 2005. – 464 с.
8. Мигаленко К.І. Математичне моделювання та дослідження величини теплового потоку факела пожежі / М. М. Семерак, А. М. Домінік, К. І. Мигаленко, Д. В. Руденко / Вісник ЛДУБЖД: Збірник наукових праць. – Львів: ЛДУБЖД, 2013. – № 7. – С. 225-230.

References

1. Kartoshkin MD Storage of fuel in power plants. M – L .: Gosenergoizdat, 1961. – 208 p.
2. 34.44.101-96 RD. Standard instruction for the storage of coal, oil shale and milled peat on the open storage power plants. – 1996.
3. Alifanov AM Inverse problems of heat / Alifanov AM – M .: Engineering, 1988. – 280 p.
4. Vanichev AP An approximate method for solving transient heat conduction with variable constants / Vanichev AP – M .: USSR Academy of Sciences – OTH, 1946. – № 12. – S. 167-174.
5. The method of finite elements in the mechanics of solids / [Sakharov AS, Kislooky VM, VV Kirichevskogo and etc.]; ed. AS Sakharov, IA Altenbaha. – K .: Vishcha School, 1982. – 480 p.
6. ANSYS, ANSYS 9.0 Manual Set, ANSYS Inc., Southpoint, 275 Technology Drive, Canonsburg, PA 15317, USA.
7. Porshnev SV Numerical methods based Mathcad / Porshnev SV Belenkova IV – SPb .: BHV-Petersburg, 2005. – 464 p.
8. Migalenko K.I. Iccally mathematical modelyuvannya doslidzhennya that the heat flux torch Pozhezhi / MM Semerak, AM Dominik, K. I. Migalenko, DV Rudenko / News LDUBZHD: Zbirnik Naukova Pratzhen. – Lviv: LDUBZHD, 2013. – №.7. – Pp. 225-230. (in Ukr.)

