

УДК 504.064.37

В.К. Костенко, Е.Л. Завьялова, Д.А. Козырь, Б.Б. Бандурян

АНАЛИЗ ВЛИЯНИЯ ВНЕШНИХ ФАКТОРОВ НА РЕЗУЛЬТАТЫ ТЕПЛОВИЗИОННОГО КОНТРОЛЯ ОЧАГОВ ГОРЕНИЯ НА ПОРОДНЫХ ОТВАЛАХ

Проведен анализ негативного влияния горящих породных отвалов на окружающую природную среду и экспериментально исследовано влияние внешних факторов на результаты температурного контроля очагов горения на породных отвалах при применении дистанционных средств и способов.

Ключевые слова: тепловизионный контроль, охрана окружающей среды, температурный контроль.

V. Kostenko, E. Zavyalova, D. Kozyr, B. Banduryan

ANALYSIS OF THE INFLUENCE OF EXTERNAL FACTORS ON RESULTS THERMAL CONTROL CENTERS FOR BURNING DUMPS

The analysis of the negative impact of burning waste heaps on the environment and experimentally investigated the influence of external factors on the results of temperature control thermal state of waste heap when using remote means and methods.

Keywords: thermal control, environmental protection, temperature control.

Проблема и ее связь с важнейшими научными и практическими задачами. В настоящее время промышленные отходы, накопленные на территории Украины, а особенно в Донецкой области составляют угрозу биосфере региона. Количество отходов, находящихся на территории Украины составляет миллиарды тонн.

В Донецкой области сосредоточены 30% и ежегодно образуется более 15% промышленных опасных отходов страны. В среднем в Донецкой области за год образуется 3038 млн. т отходов, при этом основная доля в общем объеме приходится на отходы угольной промышленности, где основным источником загрязнения атмосферы являются горящие породные отвалы [5].

В настоящее время в Украине насчитывается более 1330 породных отвалов, в том числе в Донецкой области более 600, из них около 140 горящих. Горящие породные отвалы ежегодно выделяют в атмосферу около 300 тысяч тонн загрязняющих веществ. В среднем за сутки один горящий породный отвал выделяет: угарного газа - от 1,5 до 2,8т, сернистого ангидрида - от 1,5 до 2,5т, сероводорода - от 0,34 до 0,84т, оксидов азота - 0,02-0,035т, пыли в ветреную погоду от нескольких десятков килограммов до нескольких тонн. Наиболее подвержены самовозгоранию конусные отвалы. В них находится около 80% общего объема породы. Работы по тушению и профилактике самовозгорания породных отвалов в основном сводятся к перепрофилированию конусных отвалов в плоские, которые менее подвержены самовозгоранию.

В целом процесс самовозгорания зависит от ряда горно-геологических и горнотехнических факторов. Самовозгорание сопровождается газообразованием, которое является результатом следующих основных процессов: газификации и окисления горючих материалов, реакции между газообразными компонентами, раскаленными углями и породами [7]. Процесс горения на породном отвале может распространяться со скоростью до

1 м/сутки и более. После окончания эксплуатации отвалов, зоны горения породы на их поверхности быстро исчезают, но глубинное горение продолжается до 10 лет и более .

Анализ последних исследований и публикаций. С целью выявления очагов самонагрева и своевременного принятия мер по предупреждению самовозгорания пород, должен проводиться мониторинг теплового состояния отвалов (регулярная температурная съемка). Результаты замеров температуры используют для определения объема горячей массы, необходимого для разработки проектов тушения, и объемов выбросов вредных веществ.

Нормативным документом, которым регламентируется процесс контроля теплового состояния породных отвалов, является «Инструкция по предотвращению самовозгорания, тушению и разборке породных отвалов» [6]. Требования к средствам для выполнения температурной съемки в этом документе не оговорены. В настоящее время температурная съемка, зачастую, производится с помощью контактных термометров и забитых в отвальную массу на глубины от 0,5 до 2,5м термопар. Процесс съемки трудоемкий, длительный, опасный и дорогой.

Существующая методика проведения температурной съемки породных отвалов имеет следующие существенные недостатки:

1 - по регламентированным схемам расположения точек замеров (по горизонтали - через 20м, по вертикали - слои с высотой 10м, на конических поверхностях - секторами через 450м) на породных отвалах различной формы невозможно точно определить количество, форму и площадь очагов тепловыделений;

2 - часть очагов тепловыделения размерами менее 10м, особенно без явных признаков горения, попадает между точками измерения температур и не фиксируется. Таким образом, снижается объем горячей массы, который необходимо знать при разработке проекта тушения, и снижается количество выбросов вредных веществ из данного породного отвала.

3 - оценка количества газов, выделяющихся из отвала, производится со значительными погрешностями из-за редкой сети точек измерения температуры;

4 - в очагах горения, из-за их недоступности, невозможно провести измерения температуры контактным способом.

То есть при горении отвалов невозможно существующими средствами установить достоверные сведения о количестве выбрасываемых токсичных газов, а используемые данные носят ориентировочный характер. Кроме того, выполнение работ по контролю теплового состояния породных отвалов контактными методами связаны с пребыванием людей в зонах загазованности, высоких температур, что сопряжено с угрозой отравления, ожогов, провалов или травмирования кусками породы.

Более перспективными методами контроля температуры является дистанционные способы. Компьютерная термография позволяет обеспечить безопасные условия температурной съемки поверхности породных отвалов, повысить точность и достоверность полученных результатов, обеспечить необходимую периодичность контроля, снизить затраты на выполнение этих работ [8]. Используя данные дистанционного контроля температуры можно более достоверно оценить выбросы токсичных газов в атмосферный воздух из породных отвалов.

Для широкого применения дистанционных средств и способов температурного контроля в настоящее время отсутствуют законодательно утвержденные методики, которые позволяют учитывать условия съемки и влияние внешних факторов на ее результаты. К основным внешним факторам относятся поглощение инфракрасного излучения газами, составляющими атмосферу, ослабление излучения в результате рассеяния на частицах присутствующих в атмосфере и турбулентность.

Наличие атмосферы между источником излучения и приемником обычно является причиной помех при дистанционных методах анализа. Энергия инфракрасного излучения ослабляется при прохождении через атмосферу [2]. Явления ослабления сильно затрудняют проведение измерений, внося систематическую ошибку, зависящую от длины волны

распространяющегося излучения, используемого спектрального диапазона, дистанции наблюдения и метеорологических условий. Кроме того, контрасты в полях температур и скорости ветра вызывают турбулизацию атмосферы, что значительно влияет на результаты тепловизионной съемки [1].

Постановка задачи исследований. Целью работы является экспериментальное, в лабораторных условиях, изучение влияния внешних факторов, таких как расстояние съемки, форма источника инфракрасного излучения, скорость ветра и др. на результаты температурного контроля теплового состояния породного отвала при применении дистанционных средств и способов, что позволит выделить наиболее значимые из них и, в перспективе, разработать методику оценки теплового состояния породных отвалов с помощью дистанционных средств контроля.

Результаты исследований. Для исследования теплового состояния объекта и влияния на результаты температурного контроля внешних факторов (турбулентность воздуха, пропускание инфракрасного излучения атмосферой), дистанции и ракурса температурной съемки были проведены лабораторные исследования.

Методика исследований. Лабораторные исследования проводились в помещении, где на высоте от уровня пола 0,5м, устанавливали вертикально нагревательный элемент. Для получения равномерно нагретой поверхности большей площади к нему вплотную прикреплялся лист жести.

Для оценки влияния формы источника тепла на показатели съемки проведено исследование с несколькими картонными трафаретами различной формы. Они устанавливались вплотную к металлическому листу. Трафарет имел одинаковые размеры с листом жести. Использовались трафареты площадью 0,5м² разной формы, а именно: прямоугольник, круг, овал, щель.

В помещении измерялась температура, атмосферное давление и влажность воздуха. Тепловизор устанавливался и настраивался в соответствии с инструкцией по его эксплуатации. Нагревательный элемент нагревал поверхность листа жести до стабильной температуры, которая фиксировалась по трафарету. Было выбрано минимально допустимое приближение оператора тепловизора к обследуемой поверхности - 3м. На минимальной допустимой дистанции от листа жести с трафаретом проводилась съемка настроенным тепловизором. С увеличением дистанции до 27м с шагом 3м температурная съемка повторялась. Изменяли также ракурс съемки: 30°, 60°, 90°. Лабораторный эксперимент проводили в полном объеме при использовании каждого трафарета.

Результаты лабораторных исследований при ракурсе съемки 90° и различных формах источника тепла приведены в табл. 1. Там же представлены относительные величины изменения показаний тепловизора $\Delta T = T(x)/T(x+n)$ по отношению к температуре металлической поверхности, которая установлена с помощью контактного термометра.

Таблица 1 — Результаты тепловизионной съемки

Вид трафарета	Дистанция тепловизионной съемки, м								
	27	24	21	18	15	12	9	6	3
Результаты тепловизионной съемки, °С									
прямоугольник горизонтальный, T(x+n), °С	63	65	66,5	67,8	70,4	69	71,1	74,4	78,5
круг, T(x+n), °С	63,9	65,5	67,8	68,2	68,5	71	72,9	75,8	79,3
овал, T(x+n), °С	62,5	63,7	63,9	63,8	64,5	65,7	69	74,2	77,6
прямоугольник вертикальный, T(x+n), °С	68,8	69,2	71,6	72,1	74,2	75,4	78,5	80	86

Продолжение таблицы 1

Вид графарета	Дистанция тепловизионной съемки, м								
	27	24	21	18	15	12	9	6	3
	Результаты тепловизионной съемки, °С								
щель горизонтальная, $T(x+n)$, °С	70	72,9	72,9	72,7	74,2	77	75	77	77
щель вертикальная, $T(x+n)$, °С	62,8	63,4	64	64,6	68	68	71	73,4	77,3
Температура листа жести, $T(x)$, °С	125								
ΔT (прямоугольник горизонтальный) = $T(x)/T(x+n)$	1,98	1,92	1,88	1,84	1,78	1,81	1,76	1,68	1,59
ΔT (круг)	1,96	1,91	1,84	1,83	1,82	1,76	1,71	1,65	1,58
ΔT (овал)	2,00	1,96	1,96	1,96	1,94	1,90	1,81	1,68	1,61
ΔT (прямоугольник вертикальный)	1,82	1,81	1,75	1,73	1,68	1,66	1,59	1,56	1,45
ΔT (щель горизонтальная)	1,79	1,71	1,71	1,72	1,68	1,62	1,67	1,62	1,62
ΔT (щель вертикальная)	1,99	1,97	1,95	1,93	1,84	1,84	1,76	1,70	1,62

При аппроксимации и сглаживании зависимостей изменения температурных показаний прибора от дистанции тепловизионной съемки (рис. 1), получены следующие зависимости: ΔT (прямоугольник горизонтальный) = $1,4295x^{0,0918}$, $R^2 = 0,9461$; ΔT (круг) = $1,4014x^{0,0952}$, $R^2 = 0,9712$; ΔT (овал) = $1,4357x^{0,1037}$, $R^2 = 0,953$; ΔT (прямоугольник вертикальный) = $1,2942x^{0,1008}$, $R^2 = 0,9845$; T (щель горизонтальная) = $1,5287x^{0,0382}$, $R^2 = 0,697$; ΔT (щель вертикальная) = $1,4338x^{0,0992}$, $R^2 = 0,9769$.

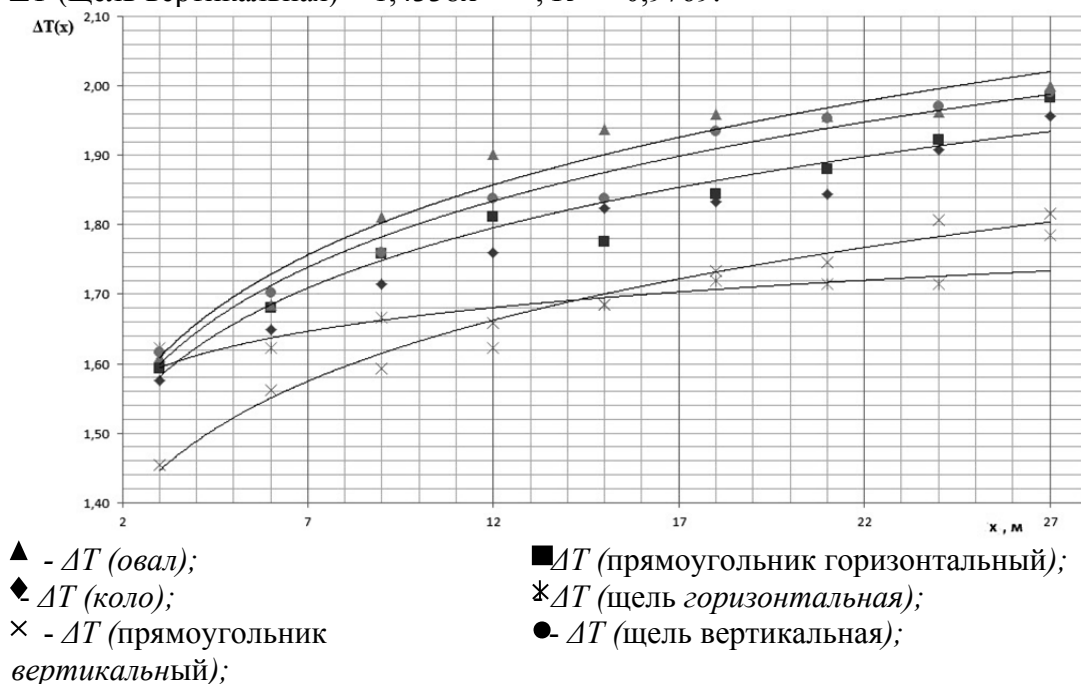


Рисунок 1 — Зависимость показаний тепловизора (ΔT) от дистанции съемки (x)

Исходя из вышеприведенных уравнений, изменение показателей измеряемой температуры с увеличением расстояния от источника тепловыделения происходит по степенному закону. С увеличением дистанции тепловизионной съемки погрешность измерения температуры увеличивается.

Согласно проведенным лабораторным исследованиям, установлено отсутствие влияния формы источника тепловыделения на показатели тепловизионной съемки.

Увеличение погрешности измерения температуры обусловлено ослаблением инфракрасного излучения атмосферой, которое в основном зависит от двух явлений [4]:

- поглощение газами, составляющими атмосферу;
- ослабление из-за рассеяния на частицах, присутствующих в атмосфере, молекулах или аэрозолях.

В первом случае поглощающие газы излучают как селективные тела в зависимости от их температуры, а во втором случае отклонения излучения от первоначального пути делает его «видимым» для системы наблюдения. В результате на объект накладывается более или менее светлая дымка.

К заметно поглощающим оптическое излучение газовым компонентам атмосферы относятся пары воды (H_2O), углекислый газ (CO_2), озон (O_3), а к слабо поглощающим относятся закись азота (N_2O), оксид углерода (CO), кислород (O_2), метан (CH_4) и азот (N_2) [2].

Полный коэффициент пропускания атмосферы равен:

$$F_{at} = F_m \cdot F_p, \quad (1)$$

где F_m - молекулярное поглощение атмосферой; F_p - рассеяние на частицах

$$F_m = F_{H_2O} \cdot F_{CO_2}, \quad (2)$$

где F_{H_2O} - поглощение инфракрасного излучения водой;

F_{CO_2} - поглощение инфракрасного излучения диоксидом углерода.

Установка поправок, корректирующих влияние этого фактора, требует дальнейших исследований. Для определения наиболее достоверной температуры источника нагрева следует выполнять тепловизионную съемку с как можно меньшего расстояния, что позволит минимизировать негативное влияние этого фактора.

В ходе лабораторных исследований было установлено, что одним из основных внешних факторов влияния на результаты температурного контроля теплового состояния породного отвала при применении дистанционных средств и способов контроля является турбулентность воздуха.

Была проведена оценка воздействия ветра на показатели дистанционного измерения температуры. Для создания потока воздуха использовался бытовой вентилятор. Изменяя его положение, создавали поток воздуха у поверхности трафарета со скоростями - 0,4м/с, 0,5м/с, 1,4м/с.

Вентилятор поочередно устанавливался за трафаретом, за тепловизором и справа от трафарета. Расстояние между вентилятором и трафаретом или тепловизором составляло 1 м. При каждой скорости вентилятора, на минимальной допустимой дистанции от нагревательного элемента проводили съемку с ракурсом 90° . С увеличением дистанции до 27м с шагом 3м температурная съемка повторялась.

Согласно эксперименту при увеличении скорости воздуха до 1,4м/с при использовании трафарета круг и ракурсе съемки 90° изменение показателей измеряемой температуры (ΔT (круг), 1,4м/с) значительно увеличивается по сравнению с изменением (ΔT (круг)), полученным при тех же условиях эксперимента без турбулизации воздуха (рис. 2).

$$T(x) = \frac{T(x+r) + \sqrt{2T(x+r)^2 - 4\left(T(x+r)^2 - C_t r^{\frac{2}{3}}\right)}}{F}, \quad (6)$$

где C_t - структурная постоянная пульсации температуры атмосферы;

F - полный коэффициент пропускания атмосферы;

r - дистанция съемки, м;

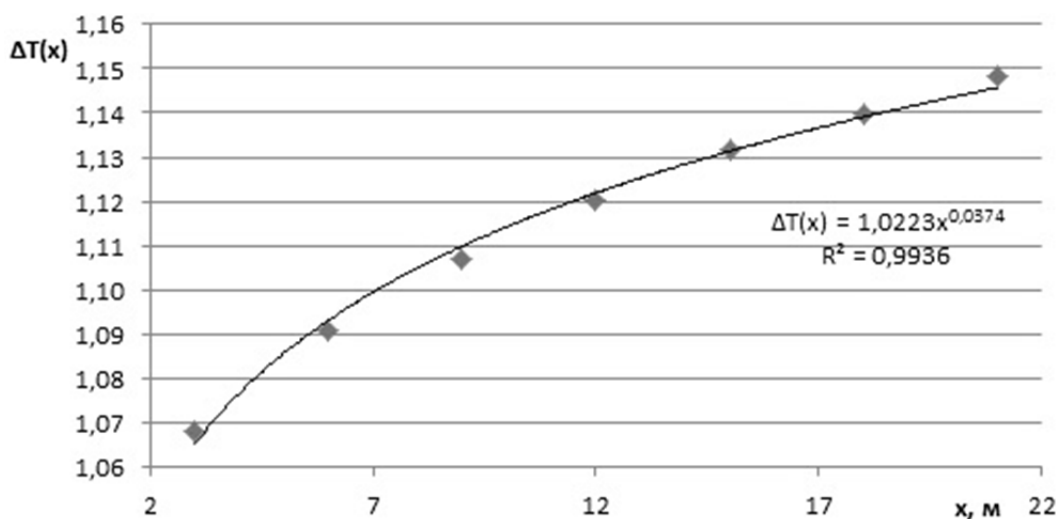
$T(x)$ - истинная температура объекта, °C;

$T(x+r)$ - температура, полученная в результате тепловизионной съемки, °C.

$$F = F_P * F_{H2O} * F_{CO2} \quad (7)$$

Исходные данные и результаты расчета влияния внешних факторов для результатов тепловизионной съемки, полученных в лабораторных исследованиях при использовании трафарета круг, ракурсе съемки 90° и скорости воздуха 1,4 м/с приведены в табл. 2. Лабораторные исследования проводились в помещении, поэтому влияние атмосферных осадков не учитывалось. Разница между экспериментально полученными и расчетными показателями не превышает 10...13%, что свидетельствует о достаточно надежной достоверности разработанной математической модели (рис.3).

Результаты проведенных лабораторных исследований позволяют сделать вывод, что изменение показаний измеряемой температуры при увеличении дистанции тепловизионной съемки увеличивается по степенному закону. Это происходит под влиянием внешних факторов (турбулентность и пропускание атмосферой инфракрасного излучения), которое снижает истинную температуру источника тепловыделения от 3% при дистанции съемки 3м до 13% при дистанции съемки 21м.



◆ $\Delta T = T(x)/T(x+n)$;

— - линия тренда;

Рисунок 3 – Сопоставление расчетной и экспериментальной относительной погрешности определения температуры очага от дистанции температурной съемки

Таблица 2 — Результаты расчета температуры источника тепловыделения с учетом влияния внешних факторов на результаты тепловизионной съемки

$T(x+r),$ $^{\circ}C$	$r, м$	F	C_t	$T(x), ^{\circ}C$	$\Delta T =$ $T(x)/T(x+n)$	Погрешность измерений температуры, %
32,0	3	0,997982	0,53531	34,18	1,07	6
30,0	6	0,997964		32,73	1,09	8
29,0	9	0,997947		32,11	1,11	10
28,6	12	0,997092		32,04	1,12	11
28,2	15	0,996866		31,91	1,13	12
28,2	18	0,996639		32,14	1,14	12
28,0	21	0,996412		32,15	1,15	13

Выводы и перспективы дальнейших исследований в данном направлении. При анализе данных лабораторных исследований установлено:

1 - форма очага горения не влияет на показатели тепловизионной съемки;
 2 - при увеличении дистанции тепловизионной съемки погрешность при измерении температуры увеличивается. Энергия инфракрасного излучения ослабляется при прохождении через атмосферу. Наличие атмосферы между источником излучения и приемником обычно является причиной помех при дистанционных методах измерения температуры;

3 - в ходе лабораторных исследований было установлено, что одним из основных внешних факторов влияния на результаты температурного контроля теплового состояния породного отвала при применении дистанционных средств и способов контроля является турбулентность воздуха. Основными причинами турбулизации воздушных течений в атмосфере является контрасты в полях температур и скорость ветра. С увеличением скорости воздуха инфракрасное излучение ослабляется, погрешность при измерениях температуры увеличивается;

4 - предложена математическая модель оценки влияния внешних факторов на параметры тепловизионной съемки, которая позволяет учесть влияние турбулентности воздуха в приземном слое атмосферы и влияние пропускания инфракрасного излучения атмосферой при определении истинной температуры источника тепловыделения;

5 - установленные зависимости изменения показаний измеряемой температуры от дистанции тепловизионной съемки и разработанная математическая модель оценки влияния внешних факторов на показатели съемки позволит разработать методику оценки теплового состояния породных отвалов с помощью дистанционных средств контроля.

Разработка методики учета внешних факторов при тепловизионной температурной съемке позволит эффективно выявлять и ликвидировать очаги на начальной стадии самовозгорания отвальной массы, уменьшить или полностью прекратить вредное воздействие породного отвала на окружающую среду путем тушения очагов горения с последующим выполнением комплекса мероприятий по предотвращению самовозгорания и поэтапном озеленении поверхности породного отвала.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Р. Хадсон. Инфракрасные системы Издательство / Р. Хадсон; пер. с английского Я. Б. Герчикова, С.Г. Кина. – Москва: «Мир» 1972 г – 537 с.;

2. Ж. Госсорг. Инфракрасная термография. Основы, техника, применение./ Ж. Госсорг. Пер. с французского Н.В. Васильченко – Москва: Мир, 1988. – 416 с., – ISBN 5-03-000915-9;
3. В.И. Татарский. Распространение волн в турбулентной атмосфере/ Татарский Валерьян Ильич – Москва: «Наука», 1967 – 588 стр.;
4. Дж. Э. Джемисон, Р.Х. Мак-фи, Дж. Н. Пласс, Р. Г. Грубе. Физика и техника инфракрасного излучения./ Пер. с английского Н.В. Васильченко – Москва: Советское радио, 1965. – 646 с.;
5. С. В. Третьяков, Г. В. Аверин. Земля тревоги нашей. По материалам Доклада о состоянии окружающей природной среды в Донецкой области в 2009 году/ С. В. Третьяков, Г. В. Аверин - Донецк, 2010 -114 с.;
6. НПАОП 10.0-5.21-04 Інструкція із запобігання самоzapалюванню, гасіння та розбирання породних відвалів, затверджена Держнаглядом України, наказ № 236 від 26.10.2004р.;
7. Зборщик М. П., Осокин В. В. Горение пород угольных месторождений и их тушение./ М. П.Зборщик, В. В. Осокин - Донецк: ДонГТУ, 2000. — 180 с.;
8. Тарасов В.В., Якушенков Ю.Г. Инфракрасные системы смотрящего типа / В. В. Тарасов, Ю. Г. Якушенков – Москва: Логос, 2004 – 444 с., - ISBN 5-94010-372-8

