

## ГОРНАЯ ТЕПЛОФИЗИКА

УДК 622.822.22; 536.2

### ФИЗИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ДИНАМИКИ ТЕМПЕРАТУРНОГО ПОЛЯ НАСЫПИ УГЛЕПОРОДНЫХ ОТВАЛОВ ДОНБАССА

**О. А. Гузеев, Е. А. Понамарева, Э. В. Борисенко**

*Институт физики горных процессов,  
E-mail: oleg.coin@mail.ru, ул. Розы Люксембург, 72, 283048, Донецк, Россия*

На территории Донбасса сформированы сотни углепородных отвалов, из которых не менее трети являются самонагревающимися. Применительно к обоснованию параметров системы температурного мониторинга самонагревающихся углепородных отвалов выполнены исследования динамики температурного поля прогреваемых модельных насыпей. Установлено, что насыпь неокисленных отвальных пород обладает более выраженными свойствами, присущими аккумулятору тепла, чем насыпь окисленных отвальных пород. Скорость изменения средней температуры и неравномерность температурного поля модельных насыпей, подверженных воздействию внутреннего и/или внешнего источников тепловыделения, определяются как гранулометрическим составом, так и термодеструкцией отвальных пород. Особенности температурной стратификации прогреваемых модельных насыпей обусловлены их генетической структурой и пространственным расположением источников тепловыделения. Полученные в ходе исследований результаты будут полезны для определения периода опроса отвальных термопрофиломеров, корректировки их позиции в приповерхностной зоне самонагревающихся отвалов, а также интерпретации данных температурного мониторинга таких техногенных образований.

*Модельная насыпь, отвальные породы, гранулометрический состав, термодеструкция, прогревание, источники тепловыделения, температурное поле*

DOI: 10.15372/FTPRPI20250317  
EDN: YNGAKW

---

За время многолетней добычи угля в Донбассе сформировано огромное количество углепородных отвалов, часть из которых является самонагревающимися. В таких техногенных образованиях сосредоточены миллионы тонн углесодержащих пород, находящихся в длительных процессах пирометаморфического преобразования [1–4]. В результате происходит существенное теплехимическое загрязнение атмосферы и безвозвратная потеря твердого органического топлива, находящегося в отвальной массе в виде угольных включений и вкраплений.

Углеродные отвалы, в том числе склонные к самонагреванию и последующему самовозгоранию, относят к категории объектов повышенной экологической опасности [5–7]. Для ликвидации очагов самовозгорания терриконов предложен ряд способов, включающих нанесение на поверхность техногенных образований изолирующего материала, а также нагнетание воды или ингибиторов в отвальные массивы [8–12]. Однако результативность таких способов не всегда высока. Отвальные очаги самовозгорания могут возникать и после выполнения соответствующих противопожарных мероприятий.

Для снижения негативного воздействия техногенных образований угольного типа на окружающую среду и рационального использования энергетических ресурсов необходимы разработка и внедрение технологии извлечения теплоты самонагревающихся углеродных отвалов. Такая технология должна включать выбор углеродных отвалов, склонных к длительной генерации и аккумуляции теплоты, а также отведение теплоты из приповерхностной зоны техногенных образований посредством теплоуловителя с циркулирующим теплоносителем.

Чтобы выявить группу углеродных отвалов, потенциально пригодных в качестве генераторов и аккумуляторов теплоты, следует прежде всего сформировать ряд поисковых критериев и признаков таких техногенных образований. Отметим, что указанными критериями и признаками предложено считать размещение отвала в геодинамически активной зоне, наличие в таком техногенном образовании многочисленных включений и вкраплений пирита и угля (в том числе подвергшегося углеводородной флюидизации), а также широкое присутствие отвальных пород, находящихся в самонапряженном состоянии [13, 14].

Приведенный ряд поисковых критериев и признаков необходимо дополнить характеристиками теплового состояния углеродных отвалов. Необходимо учитывать, что генетическая структура каждого отвала, склонного к генерации и аккумуляции теплоты, относится к пространственно-временным, особо сложным факторам самонагревания [13–16]. В этой связи корректно установить текущие тепловые характеристики такого громадного скопления отходов угледобычи представляется возможным лишь путем его температурного мониторинга. Определяемые стандартными методами [17] показатели теплоемкости и теплопроводности горных пород (неподверженных еще разрыхлению, эрозии и окислению в отвале) могут использоваться преимущественно в качестве справочных данных.

#### **ПОСТАНОВКА ЦЕЛИ И ЗАДАЧИ**

Для адаптации системы температурного мониторинга к каждому самонагревающемуся отвалу целесообразно использовать модельную насыпь. Выполняя в лабораторных условиях природоподобное прогревание такой насыпи с одновременным контролем ее теплового состояния, можно получать исходные данные и устанавливать закономерности, позволяющие точнее определять период опроса термопрофилемеров и их позицию в приповерхностной зоне отвала. Кроме того, результаты, полученные в ходе изучения изменений теплового состояния модельной насыпи отвальных пород, будут полезны для интерпретации данных мониторинга отвала в процессе подбора места размещения и режима работы отвального теплоуловителя.

Цель настоящего исследования — разработка системы температурного мониторинга самонагревающегося углеродного отвала, предназначенной для установления его текущего теплового состояния и управления извлечением теплоты такого техногенного образования. Задачей работы является определение динамики температурного поля модельных насыпей отвальных пород различного состава, находящихся под воздействием внутреннего (имитатор очага самонагревания) и внешнего (имитатор солнечного излучения) источников тепловыделения, применительно к обоснованию параметров системы температурного мониторинга самонагревающегося углеродных отвалов.

## МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Принимая во внимание процессы гравитационной сегрегации и термодеструкции пород [18], протекающие в самонагревающихся углепородных отвалах Донбасса на протяжении их жизненного цикла, для формирования модельных насыпей использовались отвальные породы, а именно аргиллиты различного гранулометрического состава (таблица), неподверженные и подверженные термодеструкции.

Характеристики отвальных пород различного гранулометрического состава

Литотип	Цвет	Гранулометрический состав, мм	Насыпная плотность $\rho$ , г/см <sup>3</sup>
Аргиллит	серый	25–75	1.14
	серый	6–25	1.18
	серый и темно-серый	0.1–6.0	1.45

Модельные насыпи отвальных пород формировались в виде миниатюрных терриконов. Диаметр модельных насыпей составлял 500 мм, высота — 235 мм. Аргиллиты выбраны в качестве насыпного материала ввиду того, что данные породы одни из наиболее типичных для самонагревающихся отвалов Донбасса. Отметим, что цвет отвальных пород — визуальный индикатор пирометаморфического преобразования, которому подвергаются складированные твердые отходы угледобычи. Ниже приведены основные показатели, характеризующие теплофизические свойства используемого насыпного материала [19]:

Показатель	Аргиллит неокисленный	Аргиллит окисленный
Тип генезиса	осадочный	пирометаморфический
Насыпная плотность $\rho$ , г/см <sup>3</sup>	1.23	1.23
Цвет	серый, темно-серый	бурый, красно-бурый
Теплопроводность $\lambda$ , Вт/(м·К)		0.25–3.12
Удельная теплоемкость $c$ , Дж/(кг·К)		508–1004
Температуропроводность $a$ , м <sup>2</sup> /с		2.10–11.6

В нижнюю часть модельных насыпей окисленных и неокисленных отвальных пород закладывались породы крупной фракции (25–75 мм), в срединную и верхнюю части — породы средней (6–25 мм) и мелкой фракций (0.1–6 мм) соответственно. Нижняя, срединная и верхняя части модельных насыпей окисленных и неокисленных отвальных пород имели одинаковую толщину.

На рис. 1 для исследований процесса формирования температурного поля каждой прогреваемой модельной насыпи 1 приведена установка, состоящая из спирали нагрева 2 (имитатор очага самонагревания), закрепленной в центре поддона 3, инфракрасной лампы 4 (имитатор солнечного излучения), датчиков температуры 5, размещенных на сеточных платах 6, микропроцессорного блока управления 7 и подключенного персонального компьютера 8. Контроль температуры воздуха в помещении, где проводились данные исследования, выполняли с помощью термометра 9.

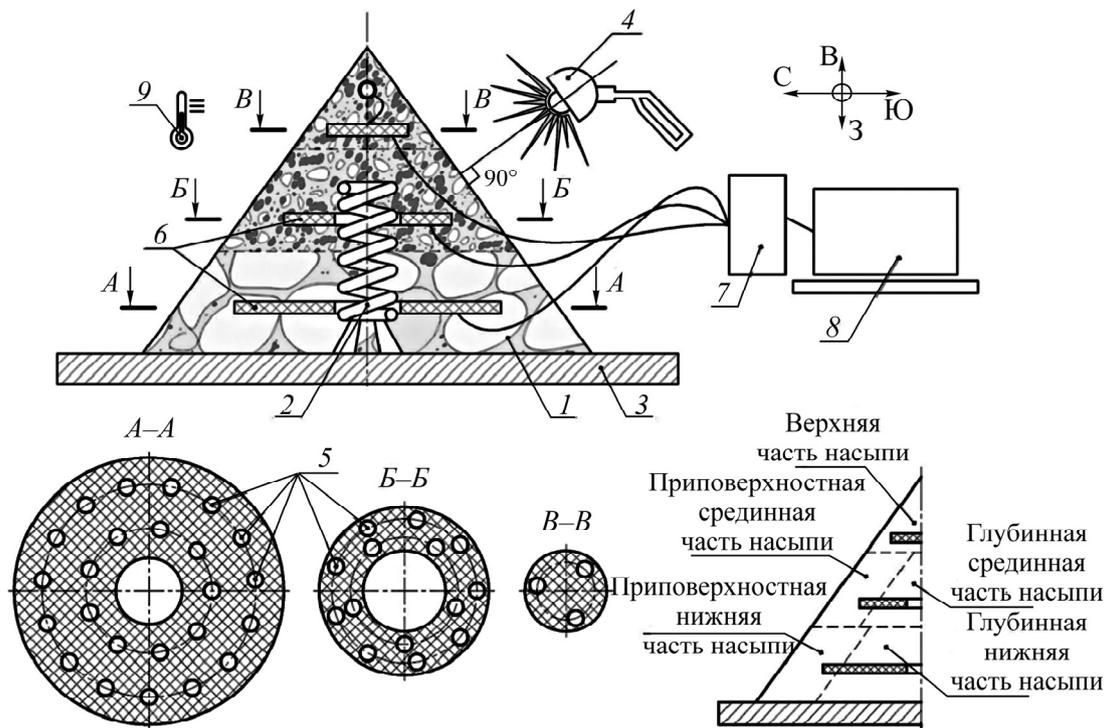


Рис. 1. Установка для исследования динамики температурного поля прогреваемых модельных насыпей отвалных пород. Пояснения в тексте

Насыпь 1 формировалась на поддоне 3. Ось симметрии конуса каждой насыпи 1 совпадала с центральной осью спирали нагрева 2. Число витков спирали 2, находившихся в нижней части насыпи 1, равнялась числу витков в срединной ее части. Сеточные платы 6 с наборами датчиков температуры 5 размещались в нижней, срединной и верхней частях каждой насыпи 1. Центры круглых сеточных плат 6 лежали на оси симметрии конуса каждой насыпи 1. Инфракрасная лампа 4 размещалась над насыпью 1 перпендикулярно ее ближайшему (южному) откосу.

Мощность спирали нагрева ограничивалась 225 Вт. Поток излучения, падающий на южный откос каждой модельной насыпи от инфракрасной лампы, составлял  $1400 \text{ Вт/м}^2$ . В качестве датчиков температуры использовались датчики DS18B20, абсолютная погрешность которых составляла  $\pm 0.5 \text{ }^\circ\text{C}$ . Период опроса датчиков температуры составлял 1 мин. Количество датчиков, имевших неизменное азимутально-ярусное размещение (рис. 2) внутри каждой насыпи, равнялось 42 шт. (в нижней части (уровень В) — 24, срединной (уровень С) — 14, верхней (уровни D, E) — 4, в том числе одна на вершине). Каждую модель насыпи с самонагревающимся углепородным отвалом связывает физическое и геометрическое подобие. Определяющим критерием подобия выступает число Фурье — безразмерная величина, позволяющая определить сходственные моменты нестационарного теплового процесса [20].

Процедура исследований динамики температурного поля каждой модельной насыпи состояла из трех модулей. В ходе первого модуля насыпь находилась под тепловым воздействием функционирующей, а затем остывающей (отключенной) спирали нагрева. Во время второго модуля насыпь прогревалась инфракрасной лампой, а затем после ее отключения находилась в состоянии естественного остывания. В рамках третьего модуля насыпь подвергалась совместному тепловому воздействию спирали и лампы. Продолжительность периодов воздействия на каждую насыпь функционирующих и остывающих источников тепловыделения во всех модулях была одинакова и составляла 90 мин.

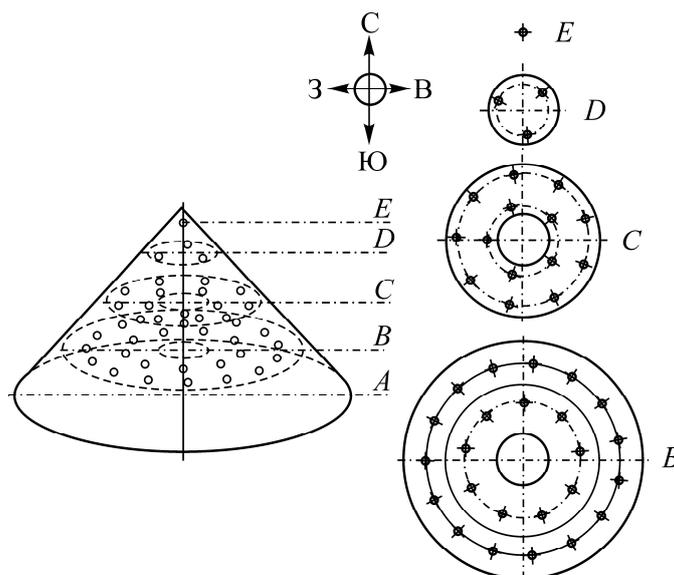


Рис. 2. Размещение датчиков температуры в контрольных точках модельной насыпи отвальных пород. Пояснения в тексте

При обработке результатов температурного мониторинга модельных насыпей использовались усредненные значения температуры  $T$ . Расчет этих показателей выполняли для каждой модельной насыпи и для конкретных ее частей (верхней, срединной глубинной и приповерхностной, нижней глубинной и приповерхностной). Средняя температура  $T_j$  каждой модельной насыпи или ее части в любой  $j$ -й момент температурного мониторинга определялась по формуле

$$T_j = \tau \frac{\sum_{i=1}^n T_{ij}}{nt_j}, \quad (1)$$

где  $\tau$  — период опроса датчиков температуры, равный 1 мин;  $T_{ij}$  — температура, зафиксированная на  $i$ -м датчике температуры в  $j$ -й опрос, °C;  $n$  — число датчиков (общее или размещенных в рассматриваемой части каждой насыпи);  $t_j$  — длительность периода измерений до  $j$ -го опроса датчиков температуры, мин.

Расчет скоростей изменения средней температуры  $V$  каждой модельной насыпи выполнялся следующим образом:

$$V = \frac{\Delta T}{t}, \quad (2)$$

где  $\Delta T$  — разница между конечным и начальным значениями средней температуры  $T$  каждой модельной насыпи за период  $t$  функционирования источников тепловыделения (с 1-й по 90-ю мин) или их остывания (с 91-й по 180-ю мин).

Результаты расчетов использовались при построении диаграмм скоростей изменения средних температур модельных насыпей и графиков развития средних температур их отдельных частей.

#### СКОРОСТЬ ИЗМЕНЕНИЯ СРЕДНЕЙ ТЕМПЕРАТУРЫ ПРОГРЕВАЕМЫХ МОДЕЛЬНЫХ НАСЫПЕЙ

В ходе исследований установлено, что скорость изменения средней температуры модельных насыпей, подверженных воздействию источников тепловыделения, в значительной степени определяется как гранулометрическим составом, так и термодеструкцией отвальных пород.

На рис. 3а изображена диаграмма скорости изменения средней температуры  $V$  модельных насыпей отвалных пород различного гранулометрического состава за время измерений  $t$ , включающее периоды функционирования и остывания внутреннего и/или внешнего источников тепловыделения.

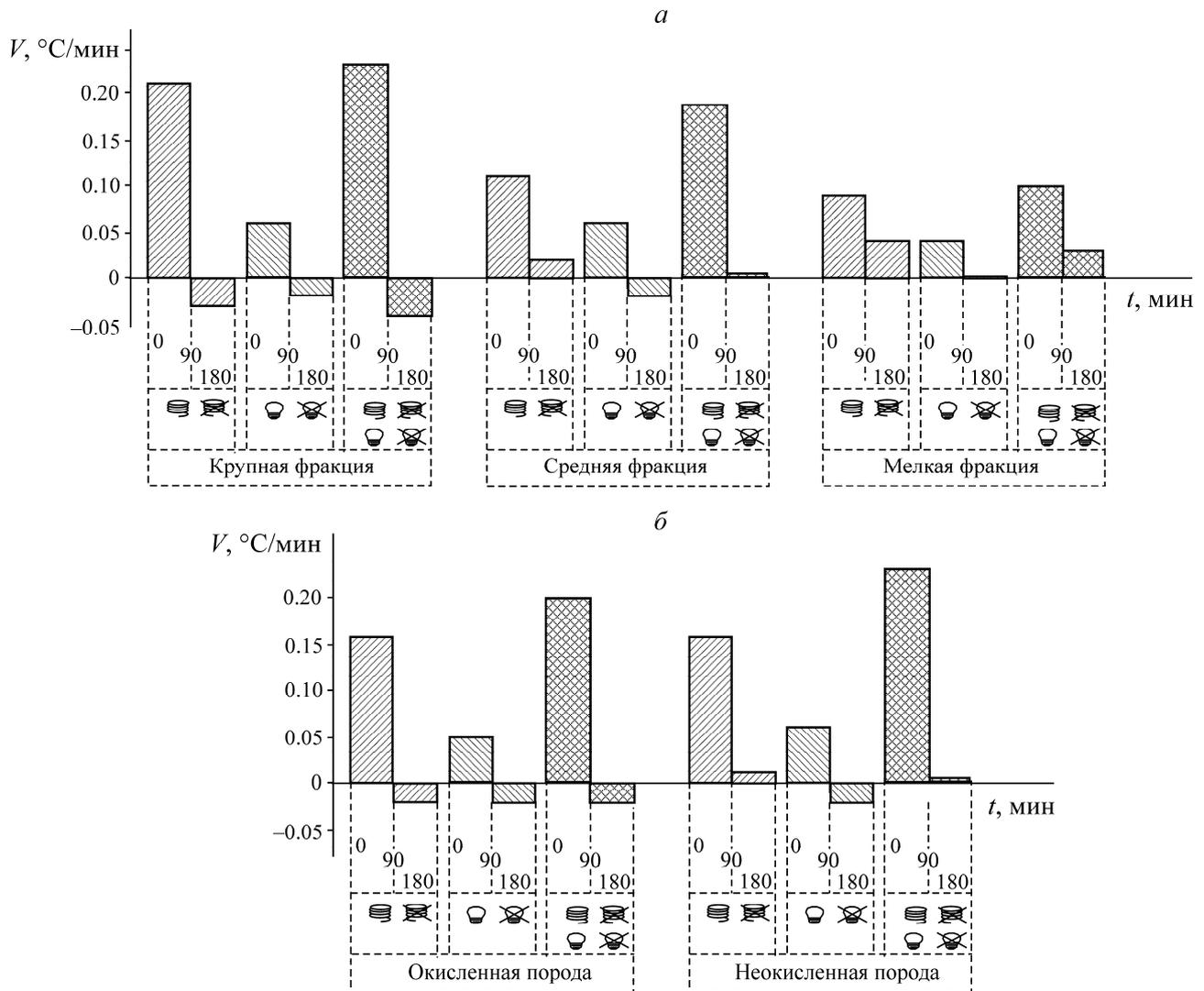


Рис. 3. Скорость изменения средней температуры прогреваемых модельных насыпей отвалных пород различного гранулометрического состава (а), а также окисленных и неокисленных отвалных пород (б) за период измерений

Данная диаграмма наглядно демонстрирует, что среди модельных насыпей различного гранулометрического состава наибольшей скоростью прогревания  $V$  спиралью нагрева отличалась насыпь пород крупной фракции, а наименьшей — мелкой фракции. После отключения спирали насыпь пород крупной фракции медленно остывала, а насыпи пород средней и мелкой фракций продолжали медленно прогреваться до окончания заданного периода измерений.

При прогревании инфракрасной лампой наибольшие значения  $V$  отмечались для насыпи пород крупной и средней фракций, а наименьшие — для насыпи пород мелкой фракции. Отключение лампы привело к медленному остыванию насыпи пород крупной и средней фракций, тепловое состояние насыпи пород мелкой фракции в этот период характеризовалось неизменностью средней температуры до окончания измерений.

В результате совместного прогрева  $V$  спиралью нагрева и инфракрасной лампой наибольшая скорость зафиксирована у модельной насыпи пород крупной фракции, а наименьшая — мелкой фракции. После отключения источников тепловыделения насыпь пород крупной фракции остывала, насыпь пород средней фракции находилась в состоянии “теплового равновесия” (средняя ее температура оставалась неизменной), а насыпь пород мелкой фракции продолжала медленно прогреваться до окончания заданного периода измерений.

Отметим, что с ростом насыпной плотности  $\rho$  отвальных пород (см. таблицу) установлено снижение скорости изменения средней температуры  $V$  модельных насыпей, находящихся под воздействием функционирующих источников тепловыделения. В период остывания источников тепловыделения наблюдались противоположно направленные изменения скорости средней температуры  $V$  модельных насыпей.

На рис. 3б приведена диаграмма скоростей изменения средней температуры  $V$  модельных насыпей окисленных и неокисленных отвальных пород за период измерений  $t$ , включающий периоды функционирования и остывания источников тепловыделения. Заметим, что периоды прогрева и остывания каждой из модельных насыпей на диаграмме соответствуют столбцам, размещенным выше и ниже оси  $t$  (характеризуются положительной и отрицательной скоростью  $V$  соответственно).

Спиралью нагрева насыпи окисленных и неокисленных отвальных пород прогревались с одинаковой скоростью  $V$ . После отключения спирали насыпь окисленных пород медленно остывала, а насыпь неокисленных пород продолжала очень медленно прогреваться до окончания заданного периода измерений.

Инфракрасной лампой насыпь неокисленных пород прогревалась несколько быстрее, чем насыпь окисленных пород. После отключения лампы насыпь окисленных пород остывала в заданный период в 2 раза быстрее, чем насыпь неокисленных пород.

При совместном тепловом воздействии насыпь неокисленных пород прогревалась с большей скоростью  $V$ , чем насыпь окисленных пород. С отключением спирали и лампы насыпь окисленных пород медленно остывала, а средняя температура насыпи неокисленных пород оставалась неизменной до окончания заданного периода измерений.

Таким образом, модельная насыпь неокисленных отвальных пород обладала свойствами, присущими аккумулятору тепловой энергии, в большей степени, чем насыпь окисленных отвальных пород одной и той же насыпной плотности. Насыпь неокисленных пород под воздействием источников тепловыделения быстрее нагревалась (заряжалась), а после отключения источников тепловыделения в заданный период измерений либо не остывала (не разряжалась), либо остывала (разряжалась) медленнее.

#### **НЕРАВНОМЕРНОСТЬ ТЕМПЕРАТУРНОГО ПОЛЯ ПРОГРЕВАЕМЫХ МОДЕЛЬНЫХ НАСЫПЕЙ**

Настоящими исследованиями установлено, что неравномерность температурного поля модельных насыпей, подверженных воздействию источников тепловыделения, в значительной степени определяется как гранулометрическим составом, так и термодеструкцией отвальных пород.

На рис. 4 представлены диаграммы диапазонов температур  $T$  в контрольных точках прогреваемых модельных насыпей за период измерений  $t$ . Диапазоны температур соответствуют началу контроля теплового состояния насыпей (0 мин), заданным периодам функционирования (с 1-й по 90-ю мин) и остывания (с 91-й по 180-ю мин) источников тепловыделения.

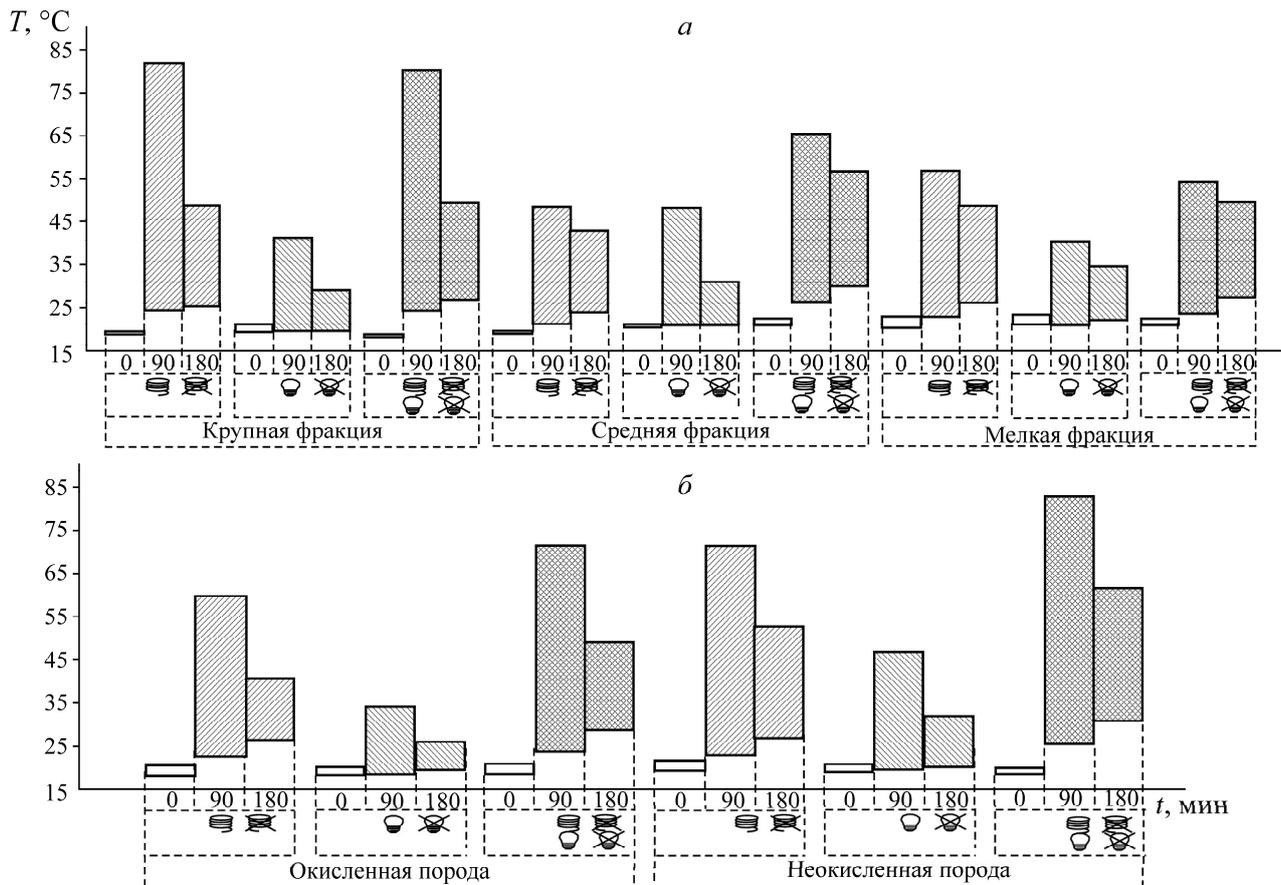


Рис. 4. Диапазоны температур контрольных точек модельных насыпей отвальных пород различных фракций (а), а также окисленных и неокисленных отвальных пород (б), находящихся под воздействием источников тепловыделения за период измерений

Среди модельных насыпей различного гранулометрического состава наибольшая неравномерность температурного поля в период прогревания спиралью нагрева присуща насыпи пород крупной фракции, а наименьшая — средней фракции. При остывании спирали наибольший диапазон температур  $T$  зафиксирован для насыпи пород крупной фракции, а наименьший — средней фракции. Во время прогревания инфракрасной лампой наибольшей неравномерностью температурного поля отличалась насыпь пород средней фракции, а наименьшей — насыпь пород мелкой фракции. В процессе остывания наибольший диапазон температур  $T$  выявлен для насыпи пород мелкой фракции, а наименьший — крупной фракции. Наибольшей неравномерностью температурного поля в период совместного прогревания характеризовалась насыпь пород крупной фракции, а наименьшей — мелкой фракции. При остывании источников тепловыделения наибольший диапазон температур  $T$  зафиксирован для насыпи пород средней фракции, а наименьший — мелкой фракции.

Обобщая результаты измерений, отметим, что с ростом насыпной плотности  $\rho$  отвальных пород наблюдалось преимущественно уменьшение диапазона температур  $T$  в контрольных точках модельных насыпей, находящихся под воздействием функционирующих источников тепловыделения. В период остывания источников тепловыделения тесной связи между насыпной плотностью  $\rho$  отвальных пород модельных насыпей и указанным диапазоном температур  $T$  не выявлено.

Наибольшей неравномерностью температурного поля в периоды прогрева спиралью нагрева, инфракрасной лампой и обоими источниками тепловыделения характеризовалась насыпь неокисленных пород. В период остывания источников тепловыделения наибольший диапазон температур  $T$  в контрольных точках также зафиксирован для насыпи неокисленных пород.

Иными словами, с ростом степени термодеструкции отвальных пород отмечалось уменьшение диапазонов температур  $T$  в контрольных точках модельных насыпей, находящихся под воздействием функционирующих и остывающих источников тепловыделения за период измерений  $t$ .

### ОСОБЕННОСТИ ТЕМПЕРАТУРНОЙ СТРАТИФИКАЦИИ ПРОГРЕВАЕМЫХ МОДЕЛЬНЫХ НАСЫПЕЙ

Изучение динамики температурного поля прогреваемых модельных насыпей окисленных и неокисленных отвальных пород выявило особенности их температурной стратификации. На рис. 5 представлены графики изменения средних температур контрольных точек нижней (приповерхностной и глубинной), срединной (приповерхностной и глубинной), а также верхней (включая вершину) частей насыпей окисленных и неокисленных отвальных пород за период измерений.

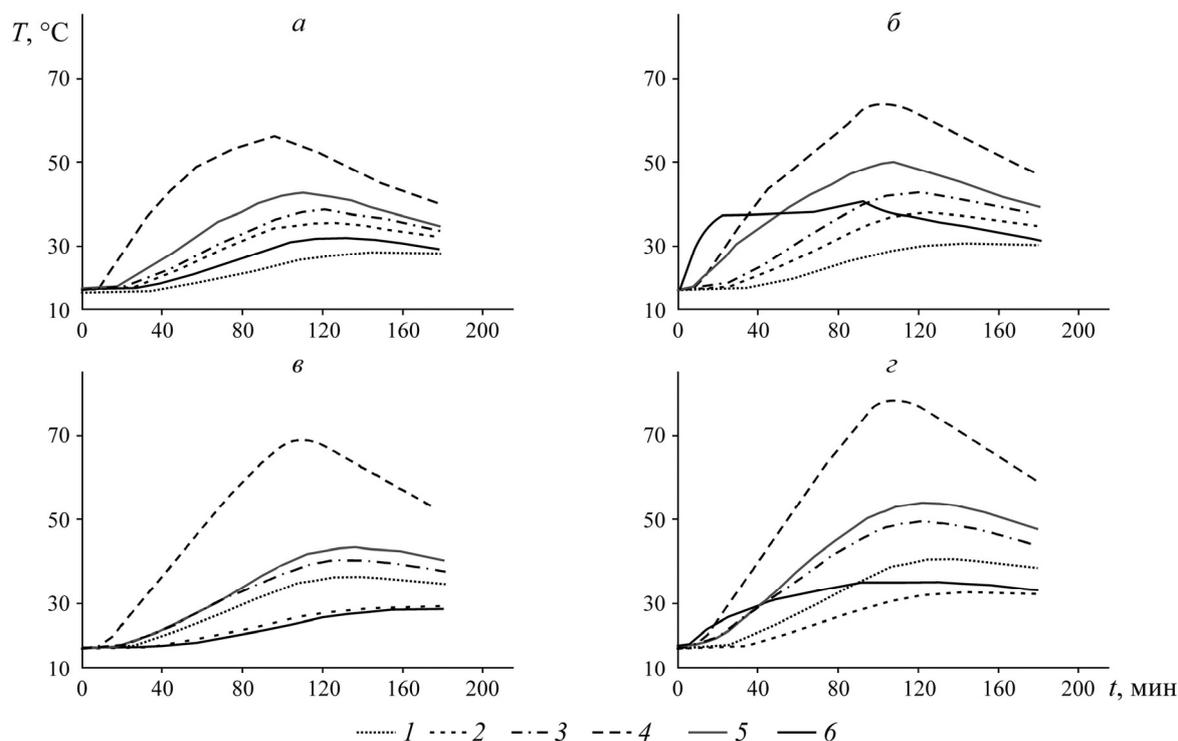


Рис. 5. Изменения средних температур нижней (приповерхностной 1 и глубинной 2), срединной (приповерхностной 3 и глубинной 4) и верхней (5), включая вершину (6), частей насыпи окисленных (*a*, *б*) и неокисленных (*в*, *г*) пород, прогреваемых спиралью нагрева (*a*, *в*) и совместно спиралью нагрева и инфракрасной лампой (*б*, *г*), за период измерений

При прогревании насыпи окисленных отвальных пород внутренним источником тепловыделения или в сочетании с внешним источником тепловыделения наибольшее изменение температур зафиксировано в ее срединной глубинной части, а наименьшее — в нижней приповерхностной части.

В случае прогревания насыпи неокисленных отвальных пород внутренним источником тепловыделения или в сочетании с внешним источником тепловыделения наибольшее изменение температур установлено в ее срединной глубинной части. Наименьшее изменение температур при прогревании внутренним источником тепловыделения зарегистрировано вблизи вершины такой насыпи, а при совместном прогревании — в ее нижней приповерхностной части.

Отметим, что при совместном воздействии на модельные насыпи окисленных и неокисленных пород внутреннего и внешнего источников тепловыделения (дневное самонагревание) не только срединная и верхняя части, но и нижняя часть прогревались интенсивнее, чем при воздействии на такие насыпи только внутреннего источника тепловыделения (ночное самонагревание). Особенности температурно-климатических (сезонных) изменений теплового состояния модельных насыпей будут посвящены дальнейшие лабораторные исследования.

### ВЫВОДЫ

Применительно к обоснованию параметров системы температурного мониторинга самонагревающихся углепородных отвалов Донбасса выполнены исследования динамики температурного поля прогреваемых модельных насыпей. Установлено, что насыпь неокисленных отвальных пород обладает более выраженными свойствами, присущими аккумулятору тепла, чем насыпь окисленных отвальных пород. Скорость изменения средней температуры и неравномерность температурного поля модельных насыпей, подверженных воздействию внутреннего и/или внешнего источников тепловыделения, определяются как гранулометрическим составом, так и термодеструкцией отвальных пород. Особенности температурной стратификации прогреваемых модельных насыпей обусловлены их генетической структурой и расположением источников тепловыделения. Моделирование “дневного” и “ночного” самонагреваний насыпей отвальных пород позволило сформировать представление о суточных изменениях их теплового состояния. Полученные в ходе исследований результаты будут полезны для определения периода опроса отвальных термопрофилемеров, корректировки их позиции в приповерхностной зоне самонагревающихся отвалов, а также интерпретации данных температурного мониторинга таких техногенных образований.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Gogola K., Rogala T., Magdziarczyk M., and Smoliński A.** The mechanisms of endogenous fires occurring in extractive waste dumping facilities, *Sustainability*, 2020, Vol. 12, No. 7. — P. 2856.
2. **Ryżański Z.** Fire hazard in coal waste dumps – selected aspects of the environmental impact, 4<sup>th</sup> Polish Mining Congress, IOP Conf. Series: Earth Environ. Sci., 2018, No. 174. — P. 1–12.
3. **Jendruś R.** Chemical and physical aspects of fires on coal waste dumps, *Zeszyty naukowe wyższej szkoły technicznej w katowicach*, 2016. No. 8. — P. 131–149.
4. **Труфанов В. Н., Рылов В. Г., Мещанинов Ф. В.** Пирометаморфогенная трансформация шахтных углеотходов в горящих террикониках Восточного Донбасса // *Изв. вузов: Северо-Кавказский регион. Сер. Естественные науки.* — 2006. — № 1 (133). — С. 88–94.
5. **Nádudvari Á., Kozielska B., Abramowicz A., Fabiańska M., Ciesielczuk J., Cabala J., and Krzykawski T.** Heavy metal-and organic-matter pollution due to self-heating coal-waste dumps in the Upper Silesian Coal Basin (Poland), *J. Hazardous Mater.*, 2021, Vol. 412. — С. 125244.
6. **Górka M., Bezyk Y., Strapoć D., and Nęcki J.** The origin of GHG’s emission from self-heating coal waste dump: Atmogeochemical interactions and environmental implications, *Int. J. Coal Geology*, 2022, Vol. 250. — С. 103912.

7. **Lupanciuc M., Fabiańska M. J., Szram E. A., and Więclaw D.** Potential water and soil contaminants from coal waste dump being at the late stage of self-heating (Rymer Cones, Poland), 30<sup>th</sup> Int. Meeting on Organic Geochemistry (IMOG 2021), European Association of Geoscientists & Engineers, 2021, No. 1. — P. 1–2.
8. **Твердов А. А., Яновский А. Б., Никишичев С. Б., Апель Г.** Профилактика и ликвидация породных отвалов // Уголь. — 2010. — № 2. — С. 3–6.
9. **Протасов С. И., Серегин Е. А., Портола В. А., Бобровникова А. А.** Исследование очагов эндогенных пожаров на породных отвалах угольных предприятий // Безопасность труда в промышленности. — 2021. — № 8. — С. 65–70.
10. **Инструкция по предупреждению экзогенной и эндогенной пожароопасности на объектах ведения горных работ угольной промышленности: федер. нормы и правила в области промышленной безопасности.** — Сер. 05. — Вып. 61. — М.: ЗАО НТЦ ПБ, 2021. — 60 с.
11. **Головченко Е. А., Момот Д. И., Пашковский О. П.** Пожаробезопасные параметры формирования плоского породного отвала // Науч. Вестн. НИИГД Респиратор. — 2021. — № 2 (58). — С. 40–47.
12. **Xiao W., Ren H., Zhao Y. et al.** Monitoring and early warning the spontaneous combustion of coal waste dumps supported by unmanned aerial vehicle remote sensing, *J. Coal Sci. Technol.*, 2023, Vol. 51, No. 2. — P. 412–421.
13. **Гузев О. А., Корвякова Н. П.** О классификации и обусловленности факторов самонагрева углелородного отвала Донбасса // Изв. вузов. Северо-Кавказский регион. Сер. Естественные науки. — 2024. — № 2(222). — С. 84–91.
14. **Борисенко Э. В., Гузев О. А., Корвякова Н. П., Подрухин А. А.** Оценка геодинамических позиций и генетических структур самонагревающихся углелородных отвалов применительно к извлечению теплоты отвальных масс // Фундаментальные и прикладные вопросы горных наук. — 2023. — Т. 10. — № 2. — С. 10–15.
15. **Гендлер С. Г., Братских А. С.** Актуальные проблемы возгорания угольных скоплений в породных отвалах // Горн. пром-сть. — 2024. — 5S. — С. 71–77.
16. **Еременко А. А., Дарбинян Т. П., Шапошник Ю. Н., Портола В. А., Цой П. А.** Определение степени окисляемости и самовозгорания руд и горных пород в естественном и водонасыщенном состояниях // ФТПРПИ. — 2023. — № 6. — С. 81–90.
17. **ГОСТ 25493-82.** Породы горные. Метод определения удельной теплоемкости и коэффициента температуропроводности: государственный стандарт Союза ССР: издание официальное: утверждено и введен в действие Постановлением Государственного комитета СССР по стандартам от 4 ноября 1982 г. № 4148 / разработан Министерством высшего и среднего образования СССР. — Москва: Издательство стандартов, 1983. — 6 с.
18. **Гамов М. И., Гордеев И. В.** Основные факторы и экологические последствия самовозгорания отвалов угольных шахт Восточного Донбасса // Изв. вузов. Северо-Кавказский регион. Сер. Естественные науки. — 2017. — № 2 (194). — С. 92–100.
19. **Физические свойства горных пород и полезных ископаемых (петрофизика)** / под. ред. Н. Б. Дортман. — М.: Недра, 1984. — 455 с.
20. **Иванов И.Е., Ерещенко В. Е.** Методы подобия физических процессов. — М.: МАДИ, 2015. — 144 с.

*Поступила в редакцию 12/II 2025*

*После доработки 29/IV 2025*

*Принята к публикации 16/V 2025*