

УДК 622.235

**П.Ю. Шелехов, Э.А. Ачеева, М.С. Баликоева**

**ИССЛЕДОВАНИЕ ПИРОФОРНОСТИ АЭРОВЗВЕСЕЙ  
ПРИ ПНЕВМОЗАРЯЖАНИИ ВЗРЫВНЫХ ПОЛОСТЕЙ  
РОССЫПНЫМИ ВЗРЫВЧАТЫМИ ВЕЩЕСТВАМИ**

*Приведено описание установки, позволяющей смоделировать, с определенными допущениями процессы, происходящие в пневмопроводе при транспортировании гранулированных ВВ.*

*Ключевые слова: процесс разогрева, теплообмен, коэффициенты теплопроводности, электризация потока, минимальная мощность.*

**Д**ля решения задачи моделирования процесса разогрева аэровзвеси ВВ при пневмозаряжении были приняты следующие допущения:

- 1) аэровзвесь заменяется эквивалентным цилиндром, температурное поле в котором описывается уравнением теплопроводности;
- 2) продольные размеры цилиндра значительно превосходят его поперечные параметры, что позволяет считать температурное поле однородным, зависящим только от координаты  $z$ ;
- 3) в момент времени  $t=0$  в эквивалентном цилиндре существуют внутренние источники тепла, распределение которых по цилиндру можно описать  $\delta$ -функцией Дирака;
- 4) рассматривается случай адиабатического процесса, т. е. теплообмен между цилиндром аэровзвеси и окружающей средой отсутствует;

В такой интерпретации решение вопроса разогрева аэровзвеси ВВ представляет собой функцию Грива второй краевой задачи для уравнения теплопроводности.

$$\frac{\partial^2 T}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \cdot \frac{\partial T}{\partial r} + \frac{W_0 \delta_0(r-r_0) \delta_0(t-t_0)}{\lambda} = \frac{1}{a} \cdot \frac{\partial T}{\partial \tau}, \quad (1)$$

$$\frac{\partial T}{\partial r} \Big|_{r=R} = 0, \quad (2)$$

$$T \Big|_{\tau=0} = 0, \quad (3)$$

где  $T$  — температура;  $r$  — текущая координата;  $\tau$  — текущее время;  $\lambda$  — коэффициент теплопроводности;  $a$  — коэффициент температуропроводности;  $W_0$  — мощность внутреннего источника тепла;  $\delta_0(r-r_0)$  — функция Дирака, описывающая изменение  $\delta_0(t-t_0)$  — внутренних источников тепла во времени и пространстве.

Вводя обобщенные координаты:

$$F_0 = \frac{a\tau}{R^2} \text{ — критерий Фурье или безразмерное время;}$$

$\bar{r} = \frac{r}{R}$  — безразмерная пространственная координата;

$\theta = \frac{T}{T_0}$  — безразмерная температура;

$P_0 = \frac{WR^2}{\lambda T_0}$  — критерий Померанцева или безразмерная мощность.

$$\text{Имеем: } \frac{\partial^2 \theta}{\partial F^2} + \frac{1}{F} \frac{\partial \theta}{\partial r} + P_0 \delta_0 (F - F_0) \delta_0 (r - \bar{r}_0) = \frac{\partial \theta}{\partial F_0}, \quad (4)$$

$$\frac{\partial \theta}{\partial r} \Big|_{r=1} = 0, \quad (5)$$

$$\theta \Big|_{F_0=0} = 0. \quad (6)$$

Решение уравнения (4) проводилось на ЭВМ, использовались разностные методы. Для дифф. уравнения (4) разностное уравнение в виде

$$\frac{\theta_{i+1,j} - 2\theta_{i,j} + \theta_{i-1,j}}{DR^2} + \frac{1}{jDR} \frac{\theta_{i+1,j} - \theta_{i-1,j}}{2DR} - \frac{\theta_{i,j+1} - \theta_{i,j-1}}{2DT} = -[P_0 \delta_0 (iDT - T_0)(iDR - R_0)]. \quad (7)$$

После преобразования уравнение (7) примет вид

$$-\frac{DT}{DR^2} \left(1 - \frac{1}{2j}\right) \theta_{i-1,\bar{j}} + \left(\frac{2DT}{DR^2} + 1\right) \theta_{i,j} - \frac{DT}{DR^2} \left(1 + \frac{1}{2j}\right) \theta_{i+1,\bar{j}} = f(T, R). \quad (8)$$

где  $DT$  — шаг сетки по времени;  $DR$  — шаг сетки по радиусу.

При этом  $i = 1 \div N$ ,  $\bar{j} = 1 \div N$ ;

Соответственно для граничных условий (3, 4) имеем

$$1 + \frac{4DT}{DR^2} \theta_{1,1} - \frac{4DT}{DR^2} \theta_{1,2} = f(T, R). \quad (9)$$

Для решения системы линейных алгебраических уравнений (6, 7) использован метод ортогонализации при

$$DR = \frac{1}{N-1}, \quad DT = 0,025.$$

В табл. 1 сведены расчетные температуры воспламенения аэровзвесей гранулированных ВВ и их компонентов.

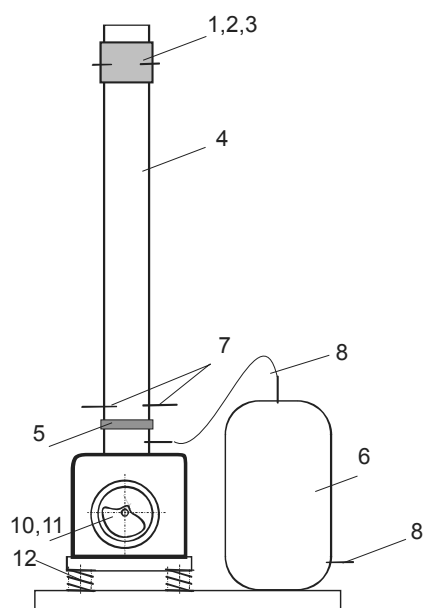
То есть, можно определить средние эквивалентные коэффициенты теплопроводности двухфазных систем; минимальные температуры воспламенения аэровзвесей; данные температур воспламенения аэровзвесей подчеркивают опасность эксплуатации зерногранулита и гранулитов с большим содержанием дизельного топлива и алюминия.

Однако более важно с практической точки зрения знание НКП, ВКП (нижнего концентрационного предела, верхнего концентрационного предела) и минимальных энергий воспламеняемости аэровзвесей гранулированных ВВ.

Таблица 1

**Минимальные температуры воспламенения аэровзвесей**

Тип аэровзвеси	Концентрация, кг/м <sup>3</sup>	Дисперсность, мм	Уд. вес Н/м <sup>3</sup> ·10 <sup>-1</sup>	$\lambda \cdot 10^{-3}$ Вт/м °К	Температура воспламенения, °К
Алюминий	0,032	0,07	2700	0,072	923
ВВ типа АС-ДТ	120	0,20	980	110	1160
ЗГ 79/21Б	120	0,20	990	37	910
Граммонал А-8	120	0,20	985	46	970



**Опытная установка для исследования пиррофорности аэровзвесей ВВ:** 1, 2 — штифты для фиксации фильтра, 3 — войлочный фильтр, 4 — камера установки, 5 — подина из губчатого железа, 6 — ресивер, 7 — электроды, 8 — воздухопровод, 9 — дебаланс, 10 — маховик, 11 — основание установки, 12 — виброопоры

которой составлял  $40 \cdot 10^{-3}$  м, выполнен из прозрачного органического стекла, обеспечивая визуальный контроль процесса воспламенения.

От компрессора подается сжатый воздух по воздухопроводу 8 в ресивер 6, на котором укреплен болтовым соединением емкость, сообщающаяся с ресивером 5 из губчатого железа. Фильтр, фиксируемый штифтами 1-2, снимается для засыпки новой порции порошка в камеру, сообщаясь при работе установки с атмосферой через кран, регулирующий давление в камере 4 в заданных пределах. Двигатель с дебалансом 9 на маховике 10 укреплен на основании установки 11, стоящей на виброопорах 12. Величина давления в емкости контролировалась манометром.

Для этого была разработана установка для определения пиррофорности аэровзвесей. Принимая во внимание определенную степень турбулентности, разделение ВВ на компоненты был создан новый тип установки, основанный на получении виброкипящего слоя частиц ВВ с переменной концентрацией по слоям. В реальных условиях частицы аэровзвеси движутся хаотично с разными относительными скоростями, что подтверждается электризацией потока. В то же время, их абсолютный вектор скорости совпадает с вектором скорости перемещения электрической искры в случае рекомбинации электростатического потока ВВ в разряд. Таким образом важно добиться в условиях эксперимента степени турбулентности испытываемой аэровзвеси соответствующей реальной. Опытная установка (рисунок) является циркулярной установкой полузакрытого типа, так как сообщается через войлочный фильтр 3 с окружающей средой, но потери частиц аэровзвеси по сравнению с объемом навески всего материала несоизмеримо малы. При исследовании не ставилась задача измерения давления и скорости его нарастания при взрыве пыли. Критической ситуацией считалось воспламенение аэровзвеси. Камера 4, внутренний диаметр

Таблица 2

**НКП и ВКП в кг/м<sup>3</sup> воспламенения аэровзвесей гранулированных ВВ**

Тип ВВ	Гранулиты				Игданит 5 % масла	ЗГ79/21Б	А-8
	АС-4	АС-4В	АС-8	АС-8В			
Влажность ВВ, %	0,20	0,14	0,20	0,10	1,4	0,30	1,3
Дисперсность ВВ, мм	0,16	0,16	0,16	0,16	0,25—	0,7—0,05	0,2
	0,25	0,25	0,25	0,25	0,4		
НКП, кг/м <sup>3</sup>	142	139	129	134	-	14,9	58,3

Концентрация аэровзвеси контролировалась прибором Ф-1 с введенным добавочным сопротивлением в мостовую схему измерительной цепи для расширения пределов измерения. Далее строились кривые изменения концентрации аэровзвесей в функции дисперсности, по которым и контролировались НКП и ВКП воспламеняемости. Изменение координат электродов 7 внутри камеры достигается перекоммутацией в системе парных электродов, размещенных по вертикали емкости через каждые 0,01 м. Такое расположение целого ряда электродов вносит некоторые искажения турбулентности виброкипящего слоя, но благодаря их малому диаметру в 1 мм, это искажение незначительно и им можно пренебречь.

Продукт, подлежащий испытанию, известных фракций и веса, засыпается в емкость и ложится на ее пористое дно. В ресивер подается сжатый воздух и включается двигатель вибросистемы. Смесь задерживается в объеме. Подключается источник высокого напряжения типа АКИ-59 или АКИ-70, шунтированный емкостью, подающий искру определенной мощности в аэровзвесь, концентрация которой контролируется. Далее определялась энергия воспламенения аэровзвеси в зависимости от ее концентрации.

Принимая во внимание условия, в которых находится поток гранулированного ВВ в пневмомагистрали, был создан новый тип установки, основанный на получении виброкипящего слоя частиц ВВ с переменной концентрацией по слоям. Это позволило смоделировать, с определенными допущениями процессы, происходящие в пневмопроводе при транспортировании гранулированных ВВ.

Экспериментальному определению НКП и ВКП были подвергнуты гранулиты АС-4, АС-4В, АС-8В, игданит, зерногранулит 79/21Б и граммонал А-8.

ВКП аэровзвесей определяется из условия стабильности прекращения воспламенения двухфазной системы от некоторой минимальной мощности искры при известной дисперсности твердой фазы

В табл. 2 приведены результаты исследования аммиачной селитры, алюминиевой пудры и солярового масла, являющихся основными составными частями гранулитов.

Наибольшей восприимчивостью к искровому разряду отличается зерногранулит 79/21Б, что объясняется двумя причинами. Во-первых, это наиболее пылящее гранулированное ВВ, во-вторых — содержание тринитротолуола в составе ЗГ79/21Б снижает минимальный предел того количества теплоты, получение которого ВВ обеспечивает начало реакции горения. Более высокое значение минимальной энергии воспламенения граммонала А-8 объясняется, очевидно, меньшим содержанием тротила и меньшей склонностью разделения

этого ВВ на компоненты. Омасленные гранулиты требуют для начала реакции горения значительно большего количества теплоты, так как отделенные минимально возможные фракции навески ВВ, содержащие в своем составе дизельное топливо, коагулируются в сгустки большого диаметра; алюминий обволакивается маслом, что резко снижает его способность к окислению.

---

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Емекеев В.И., Шелехов П.Ю. Монография. Борьба со статическим электричеством при пневмозарядки скважин россыпными В.В. Цветметинформация, 1970.
2. Шелехов П.Ю. Аналитическая оценка возникновения электрического разряда в пневмопроводе. Изв. ВУС СК, технические науки. Приложение 5. Ростов, 2006. **ГИАБ**

---

#### КОРОТКО ОБ АВТОРАХ

Шелехов Павел Юрьевич — доктор технических наук, профессор, академик АГН (академик горных наук), заслуженный работник народного образования РСО-Алания,  
Ачеева Элина Асламбековна — старший преподаватель, e-mail: elina.acheeva@mail,  
Баликова Маргарита Сергеевна — кандидат экономических наук, доцент,  
Северо-Кавказский горно-металлургический институт (государственный технологический университет).

---

#### ОТДЕЛЬНЫЕ СТАТЬИ ГОРНОГО ИНФОРМАЦИОННО-АНАЛИТИЧЕСКОГО БЮЛЛЕТЕНЯ (ПРЕПРИНТ)

##### О СТРУКТУРЕ ФОРМИРОВАНИЯ ЭКОНОМИЧЕСКИХ ПОСЛЕДСТВИЙ ПОГРЕШНОСТИ ГЕОМЕТРИЗАЦИИ ПРИ ЭКСПЛУАТАЦИИ МЕСТОРОЖДЕНИЙ

Абрамян Г.О., Дагбы У.В., Парамонов С.С., Толчкова Е.Н.

Отдельные статьи Горного информационно-аналитического бюллетеня (научно-технического журнала). — 2012. — № 5. — 12 с.

Рассмотрена проблема оценки экономических последствий погрешности геометризации при эксплуатации месторождений. Показано, что существующая методика решения этой проблемы не учитывает статистические ошибки I-го и II-го родов, которая является следствием стохастического характера размещения горно-геологических факторов в пространстве месторождения. Предложена новая методика оценки экономических последствий погрешности геометризации при использовании прогнозных математических моделей горно-геологических факторов. Она позволяет исследовать эту проблему с вероятностной точки зрения и принимать менее рискованные решения при планировании горных работ. Приведены результаты исследований месторождения Красная Шапочка ПО «Севералбокситруда».

Ключевые слова: экономические последствия, погрешность геометризации, поле месторождения, горно-геологические факторы, эксплуатационная разведочная сеть, статистические ошибки I-го и II-го родов, уровень значимости, мощность критерия.

##### ABOUT STRUCTURE OF FORMATION OF THE ECONOMIC CONSEQUENCES OF THE ERROR OF GEOMETRIZATION AT OPERATION OF FIELDS

Abramyan G.O., Dagby U.V., Paramonov S.S., Tolchkova E.N.

The problem of an assessment of economic consequences of an error of geometrization is considered at operation of fields. It is shown that the existing technique of the solution of this problem doesn't consider statistical errors of I and II-nd childbirth which is a consequence of stochastic nature of placement of mining-and-geological factors in field space. The new technique of an assessment of economic consequences of an error of geometrization is offered when using look-ahead mathematical models of mining-and-geological factors. She allows to investigate this problem from the likelihood point of view and to make less risky decisions when planning mining works. Results of researches of a field the Little Red Riding Hood PO "Severalboksitrud" are given.

Key words: economic consequences, geometrization error, field field, mining-and-geological factors, operational prospecting network, statistical errors of I and II-nd childbirth, significance value, criterion capacity.