

УДК 614.84

Доц. *И.В. Цебрюк*<sup>1</sup>, канд. техн. наук; доц. *С.А. Виноградов*<sup>2</sup>,  
канд. техн. наук; доц. *А.Я. Калиновський*<sup>2</sup>, канд. техн. наук;  
нач. каф. *В.А. Темников*<sup>1</sup>, канд. воен. наук

## АНАЛИЗ АВТОМОБИЛЬНЫХ И ДРУГИХ СРЕДСТВ ТУШЕНИЯ ГАЗОВЫХ ФОНТАНОВ, РАЗРАБОТКА ИХ КЛАССИФИКАЦИИ И ИНДЕКСАЦИИ

Пожары газовых фонтанов являются сложной чрезвычайной ситуацией техногенного характера, при тушении которых возникает необходимость привлечения большого количества сил и средств. Такие чрезвычайные ситуации влекут за собой значительные материальные и экологические потери, а иногда и человеческие жертвы. При этом для тушения пожаров газовых фонтанов в разных странах используются различные способы и средства.

Все известные средства тушения пожаров газовых фонтанов разделены на пять основных групп: тушение с помощью доставки в факел струйного непрерывного потока огнетушащего вещества (применение лафетных стволов, автомобилей газодляного тушения и т.п.), тушение импульсными установками пожаротушения (ППШ-200, Импульс-Шторм, Fire Commander и т. п.), применение взрывчатых веществ для срыва и тушения горящего факела, без доставки огнетушащего вещества в зону горения (применение превенторов и бурение наклонных скважин) и совместное использование нескольких подходов. По каждой из групп проведен глубокий анализ всех средств пожаротушения, раскрыты особенности каждого из них, механизмы прекращения горения, которые реализует каждый из этих способов при взаимодействии с факелом.

На основании проведенного анализа разработан многоуровневый классификатор и индексатор средств тушения газовых фонтанов, учитывающий способ тушения, вид огнетушащего вещества и механизм прекращения горения.

**Ключевые слова:** газовый фонтан, пожаротушение, классификация, индексация.

**Постановка проблемы.** Пожар газового фонтана является сложной чрезвычайной ситуацией техногенного характера, ликвидация которой связана со значительными финансовыми затратами и необходимости привлечения большого количества пожарной техники и личного состава.

Для тушения пожаров газовых фонтанов разработано множество различных методов и способов, что обусловлено, с одной стороны, исключительной сложностью технической проблемы, многофакторностью и разнообразием конкретных ситуаций на таких пожарах, а с другой – ограниченной эффективностью каждого из этих способов. Несмотря на разнообразие технических средств и технологий тушения пожаров газовых фонтанов, на сегодняшний день отсутствует наиболее емкая их классификация, а также индексация, по которой можно было бы идентифицировать то или иное средство.

**Анализ последних исследований и публикаций.** Наиболее полно вопросы тушения пожаров газовых фонтанов раскрыты в работах [1-5]. В работе [3] предложено для тушения газовых фонтанов использовать импульсные струи жидкости высокой скорости. Классификация техники для тушения пожаров приведена в [6]. В работе [3] раскрыта общая классификация средств тушения газовых фонтанов, которая, однако, не удовлетворяет современным требовани-

ям и не учитывает современные тенденции их развития. На сегодняшний день индексация средств тушения газовых фонтанов отсутствует.

**Постановка задачи и ее решение.** В основу работы положена задача провести литературный обзор средств и технологий тушения пожаров газовых фонтанов, которые применяются в мировом опыте тушения подобных возгораний, и на его основании разработать классификацию и индексацию средств тушения пожаров газовых фонтанов.

Учитывая современный этап развития способов и средств тушения открытых газовых фонтанов, их можно условно разделить на следующие группы:

- 1) тушение с помощью доставки в факел струйного непрерывного потока огнетушащего вещества;
- 2) тушение импульсными установками пожаротушения, использующие различные огнетушащие вещества;
- 3) применение взрывчатых веществ для срыва и тушения горящего факела;
- 4) без доставки огнетушащего вещества в зону горения;
- 5) совместное использование нескольких подходов.

Приведенное разделение на группы, однако, не может рассматриваться как классификация способов тушения газовых фонтанов, поскольку каждая из групп включает несколько способов и является слишком широкой. Пожалуй, самый распространенный подход к тушению нефтегазовых фонтанов – тушение с помощью доставки в факел струйного непрерывного потока огнетушащего вещества. Наиболее простой способ, реализующий этот подход – тушение непрерывными струями воды из лафетных стволов [1, 3-5, 7-8]. В большинстве случаев этот способ заключается в том, что струи воды, подаваемые из лафетных стволов со скоростью до 50 м/с, направляются на устье скважины в основании струи фонтана. Затем синхронно поднимают водяные струи вверх по столбу пламени до полного его отрыва.

Известны способы [9], при которых на устьевое оборудование устанавливаются стационарные стволы, направленные по одной оси с нефтегазовым потоком или под некоторым углом к нему. В этом случае вода подается непосредственно в зону образования горючей смеси и увеличивается эффективность тушения. Известны способы совмещения водяных струй с порошковыми огнетушителями, что дополнительно позволяет вводить ингибиторы горения в факел. В ряде стран изготовлены и используются для тушения различных пожаров пожарные машины на гусеничном или колесном бронированном шасси с установленным стационарным лафетным стволом разной мощности: ГПМ-54, ГПМ-54 м, ГПМ-64 (СССР, Украина), SPOT-55 (Чехия, Словакия), пожарная машина на базе Нона-СВК (Россия), китайский пожарный танк [8].

Эффективным и распространенным способом тушения газовых фонтанов является использование специальной техники, которая позволяет непрерывно доставлять в зону горения газодляной поток высокой скорости. В зависимости от исполнения, базой для этих машин может служить грузовой автомобиль, как в АГВТ-100 и АГВТ-150 (СССР, страны СНГ), танк, как машинах "The Big Wind" (Венгрия) и JFR-250 (Украина), либо гусеничный самоходный паром, как в ПСУГВТ-200 (Украина) [3, 4, 6, 7]. Газодляные струи, создава-

<sup>1</sup> Национальная академия национальной гвардии Украины;

<sup>2</sup> Национальный университет гражданской защиты Украины

емые этими установками, представляют собой смесь отработанных газов турбореактивного двигателя и распыленной воды. В газовой струе автомобиля содержится около 60 % воды и 40 % газа, на выходе из сопла концентрация кислорода не более 14 %, по мере удаления от сопла содержание кислорода увеличивается и в рабочем сечении, т. е. на расстоянии 12-15 м составляет 17-18 %. Вода частично испаряется, попадая в струю раскаленного газа, а в зону горения вода попадает в распыленном состоянии. Экспериментально установлено, что газовая струя обладает высоким охлаждающим эффектом, например: при подаче 60 л/с воды (АГВТ-100) в течение 5 мин температура фонтанной арматуры снижается с 950 до 100-150°C.

Еще одним вариантом непрерывной струйной доставки огнетушащего вещества в зону горения является использование автомобилей порошкового тушения, способных подавать огнетушащий порошок с производительностью 50 кг/с на дистанцию до 50 м [7, 22, 23]. Однако этот способ не получил распространения в силу его высокой стоимости и большого загрязнения окружающей среды. Известны разработки [10], основанные на струйной доставке в зону горения инертных газов с определенными параметрами (скорость доставки, количество инертного газа). Однако на практике для тушения нефтегазовых фонтанов эти способы не применяются.

Импульсная доставка огнетушащего вещества в зону горения – наиболее перспективное направление развития средств борьбы с пожарами различных классов и, в частности, пожаров нефтегазовых фонтанов. Преимуществами импульсного пожаротушения являются: повышение эффективности тушения за счет увеличения дисперсности потока, увеличение дальности подачи огнетушащего вещества и повышенная мобильность установок тушения.

Эффективным способом тушения нефтегазовых фонтанов является применение импульсного выброса заряда огнетушащего порошка различными установками [3, 11]. Тушение пожара осуществляется за счет ингибирующего действия на горящий факел огнетушащего порошка, выброс которого осуществляется энергией сжатого воздуха или порохового заряда. В зоне горения фонтана в течение короткого времени (1÷2 с) импульсно создается огнетушащая концентрация порошка путем направленного залпового выброса установкой. В Украине разработаны и активно применяются возимые пневматические порошковые пламяподаватели ППП-200, содержащие 200 кг огнетушащего порошка, выбрасываемые за один выстрел [3, 12]. Известны разработки [13], в которых использованы стационарно установленные импульсные порошковые установки пожаротушения, автоматически срабатывающие при возникновении пожара, который определяется инфракрасными излучателями или тепловизорами.

На базе танковых шасси в Украине созданы мощные установки импульсного пожаротушения Импульс-1, Импульс-2, Импульс-3М, а также Импульс-Шторм [11]. Машины имеют 50 стволов (Импульс-1-40), в каждый из которых заряжается по 30 кг порошка. Импульс-Шторм способен доставить в очаг пожара за 4 с 1,5 т огнетушащего порошка. Это позволяет создать мощное огнетушащее воздействие сразу и одновременно по всей площади или объему. Основным отличием данной установки является мощное ударное воздействие на

очаг пожара в соединении с огнетушащими эффектами, производимыми специальными порошковыми составами. Дальность эффективного тушения составляет до 50 м.

Наиболее безопасным огнетушащим веществом, с точки зрения влияния на человека и окружающую среду, является вода. Применение ее для тушения газовых фонтанов в импульсном режиме подачи реализовано фирмой iFEX в виде установок залпового водяного пожаротушения, установленных на шасси внедорожника, вертолета или танка Leopard 1 [14-15]. Наиболее впечатляющим устройством из перечисленных является Fire Commander. Эта машина способна за минуту производить до 6-7 импульсных выбросов 25-литрового водяного заряда на дистанцию до 65 м. Для обеспечения непрерывной подачи воды машина оснащена насосной установкой. Хотя на сегодня авторам не известны результаты испытаний данной установки для тушения нефтегазовых фонтанов, очевидным является перспективы ее использования.

Новым перспективным способом тушения нефтегазовых фонтанов является применение импульсных струй жидкости высокой скорости, подаваемых в зону зажигающего кольца фонтана [3, 16]. Применение такого способа уменьшает затраты на пожаротушение и позволяет значительно увеличить дальность эффективного тушения. Тушения газовых фонтанов с помощью подрыва заряда взрывчатого вещества является одним из первых способов борьбы с подобными возгораниями, и иногда используется и по сей день [1, 3, 12].

Заряд взрывчатого вещества подается к устью скважины либо по стальному тросу, перекинутому через блоки, подвешенные на специальных опорах, либо на тележке с уклоном по рельсовым путям, проложенным к устью скважины. Главными недостатками этого метода является его высокая опасность и необходимость большого количества взрывчатого вещества (100-1000 кг). При этом вследствие наличия мощной ударной волны уже при количестве взрывчатого вещества 100 кг безопасное расстояние для человека составляет более 150 м, а устьевое оборудование разрушается на расстоянии менее 40 м.

Известен также способ тушения нефтегазовых фонтанов, при котором заряд взрывчатого вещества закладывают по окружности у устья скважины, а сверху укладывают контейнеры с огнетушащим порошком [17]. При подрыве заряда ВВ огнетушащий порошок попадает в зону зажигающего кольца фонтана и оказывает мощное ингибирующее действие. В случае применения этого способа количество ВВ может быть уменьшено в несколько раз, по сравнению с взрывным способом, описанным ранее (из расчета 1 кг ВВ на 100 кг огнетушащего порошка). Однако для реализации этого способа необходимо выполнить огромный объем сложных и опасных подготовительных работ, которые не всегда можно выполнить.

Кроме перечисленных способов, для тушения пожаров газовых фонтанов применяются способы тушения без доставки огнетушащего вещества в зону горения. В таком случае применяются металлические колпаки различной конструкции или железобетонные плиты, надвигаемые на устье фонтанирующей скважины [3, 18-19]. Этим прекращается подача окислителя в зону реакции и горение прекращается. Однако эти способы очень редко используются, что обусловлено их низкой эффективностью и сложностью.

Для тушения мощных фонтанов производят бурение наклонной скважины по отношению к основному столбу [2, 3, 12]. Таких скважин может быть несколько. После того, как дополнительные скважины соединятся с основной, давление и скорость потока в последней значительно упадет и ее можно заглушить с помощью превентора или потушить пламя любым из приведенных выше способов. Несмотря на преимущества всех перечисленных способов и средств, учитывая специфику пожаров газовых фонтанов и сложность их тушения, наиболее часто для тушения таких возгораний применяют несколько подходов одновременно [3]: лафетные стволы совместно с машинами газоводяного тушения, ППП-200 совместно со струйной подачей и т. п.

С учетом проведенного анализа, все средства тушения газовых фонтанов базируются на двух принципиально отличных методах тушения:

- 1) тушение фонтана с доставкой огнетушащего вещества в зону горения;
- 2) тушение без доставки огнетушащего вещества.

Примем для индексации способов тушения газовых фонтанов с доставкой огнетушащего вещества в зону горения литеру А, а для способов тушения без доставки – литеру В.

Далее будем рассматривать отдельно классификацию способов, которые реализуют два перечисленных метода. Проведенный анализ позволил установить, что метод тушения газовых фонтанов с доставкой огнетушащего вещества в зону горения (А) делится на следующие способы:

- 1) импульсная доставка огнетушащего вещества;
- 2) непрерывная доставка огнетушащего вещества.

Для удобства индексации примем для способа импульсной доставки огнетушащего вещества римскую цифру I, а для способа непрерывной доставки – цифру II. Рассматривая каждый из перечисленных способов отдельно и их совокупность, можно увидеть, что для их реализации используются следующие огнетушащие вещества:

- 1) водяное огнетушащее вещество;
- 2) огнетушащая пена;
- 3) огнетушащий порошок;
- 4) негорючие газы.

В общей индексации нами для них приняты следующие индексы, исходя из понятности определений:

- W – для водяных огнетушащих веществ (от англ. water);
- F – для огнетушащей пены (от англ. foam);
- P – для огнетушащих порошков (от англ. powder)
- G – для негорючих газов (от англ. gas).

Итак, каждый из перечисленных огнетушащих веществ реализует один или несколько механизмов прекращения горения газового фонтана:

- 1) охлаждение зоны горения;
- 2) изоляция зоны горения;
- 3) ингибирование горения;
- 4) разбавление продуктов горения;
- 5) механический срыв факела.

В общей индексации для каждого из перечисленных способов принят индекс, соответствующий арабской цифре в приведенном выше списке (1 – охлаждение зоны горения, 2 – изоляция зоны горения и т. д.).

Таким образом, для метода тушения газовых фонтанов с доставкой огнетушащего вещества в зону горения принят четырехуровневый классификатор с соответствующими индексированными значениями (рис. 1).



Рис. 1. Классификатор метода тушения пожаров газовых фонтанов с доставкой огнетушащего вещества в зону горения

Метод тушения пожаров газовых фонтанов без доставки в зону горения огнетушащего вещества на основании проведенного анализа, по нашему мнению, может быть разделен на следующие способы:

- 1) прекращение подачи огнетушащего вещества;
- 2) прекращение доступа окислителя;
- 3) взрывной способ.

В принятой индексации для них применяются римские цифры III, IV и V, соответственно.

Перечисленные способы реализует следующие механизмы прекращения горения (индекс):

- 1) изоляция зоны горения (2);
- 2) ингибирование горения (3);
- 3) разбавление продуктов горения (4);
- 4) срыв факела (5).

Таким образом, для метода тушения газовых фонтанов без доставки огнетушащего вещества принят трехуровневый классификатор с соответствующими индексированными значениями (рис. 2).

**Выводы.** В работе проведен анализ мировых средств и технологий тушения газовых фонтанов. Все средства разделены на два больших метода – с доставкой огнетушащих веществ в зону горения и без таковой. Для каждого из методов разработан многоуровневый классификатор, учитывающий способ туше-

ння, вид огнетушачего вещества и механизм прекращения горения. Кроме этого, на каждом из уровней присвоены соответствующие индексы. Например, в соответствии с принятой индексацией, тушение пожаров газовых фонтанов лафетными стволами индексируется как АІW145, а с помощью ППП-200-АІР35.

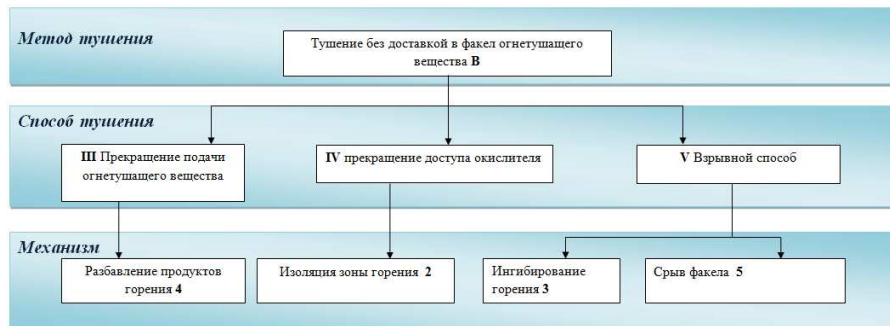


Рис. 2. Классификатор метода тушения пожаров газовых фонтанов без доставки огнетушачего вещества в зону горения

Разработанный классификатор и индексатор предлагается использовать при рассмотрении приемов и средств тушения пожаров газовых фонтанов при изучении дисциплин "Противопожарная и аварийно-спасательная техника" и "Пожарная тактика" для слушателей, обучающихся по специальности "Пожарная безопасность".

### Литература

1. Мамиконянц Г.М. Тушение пожаров мощных газовых и нефтяных фонтанов / Г.М. Мамиконянц. – М. : Изд-во "Недра", 1971. – 95 с.
2. Чабаяв Л.У. Технологические и методологические основы предупреждения и ликвидации газовых фонтанов при эксплуатации и ремонте скважин : автореф. дисс. на соискание учен. степени д-ра техн. наук: спец. 05.26.03 "Пожарная и промышленная безопасность (нефтегазовый комплекс)" / Л.У. Чабаяв. – Уфа. – 2009. – 38 с.
3. Виноградов С.А. Підвищення ефективності гасіння газових фонтанів : дис. ... канд. техн. наук: спец. 21.06.02 / Виноградов Станіслав Андрійович. – Харків, 2012. – 168 с.
4. Абдурагимов И.М. Физико-химические основы развития и тушения пожаров / И.М. Абдурагимов, В.Ю. Говоров, В.Е. Макаров. – М. : Изд-во ВИПТШ МВД СССР, 1980. – 255 с.
5. Holand P. Offshore Blowouts. Causes and control / P. Holand. – Gulf Publishing Company Houston, Texas, 1997. – 163 p.
6. Иванов А.Ф. Пожарная техника : учебник [для учаш. пож.-техн. училищ]. – Ч. 2. Пожарные автомобили / А.Ф. Иванов, П.П. Алексеев, М.Д. Безбородько и др.; под ред. А.Ф. Иванова. – М. : Изд-во "Стройиздат", 1988. – 286 с.
7. Dwight Pfenning, David Evans. Suppression of Gas Well Blowout Fires Using Water Sprays; Large and Small Scale Studies / Presented at American Petroleum Institute, Committee on Fire and Safety Protection, Production Session, Hyatt Regency, San Antonio, Texas, September 11-13, 1984. – Pp. 129-132.
8. David Evans, Dwight Pfenning. Water Sprays Suppress Gas-well Blowout Fires // Oil and Gas Journal. Technology, Apr 29, 1985. – Pp. 80-86.
9. Muthana A M Jamel. Oil and Gas Well's Fires / Muthana A M Jamel. [Electronic resource]. – Mode of access <http://www.docstoc.com/docs/26581997/Modelling-the-Oil-Well-Fire-and-Extinguish>
10. Пат. 2130113 Российской Федерации, МПК<sup>с</sup> E21B35/00. Способ тушения пожара газового и нефтяного фонтана и устройство для его осуществления / Алексеев Ю.С., Брилев Ю.П., Дорошкевич В.К. и др.; заявитель и патентообладатель Нода А.А. и Свириденко Н.Ф. № 97116327/03; заявл. 24.09.1997; опубл. 10.05.1999.

11. Захматов В. Гасіння газових фонтанів імпульсними установками пожежогасіння / В. Захматов, В. Цікановський, О. Кожем'якин // Охорона праці : зб. наук. праць. – 1997. – № 5. – С. 112-115.
12. Логанов Д.Ю. Открытые фонтаны и борьба с ними : справочник / Ю.Д. Логанов, В.В. Соболевский, В.М. Симонов. – М. : Изд-во "Наука", 1991. – 189 с.
13. Korobeinichev O.P. IMPULSE SPRAY FIRE-EXTINGUISHING SYSTEM / O.P. Korobeinichev, A.G. Shmakov, A.G. Tereshchenko // Chia Laguna, Cagliari, Sardinia, Italy. – 2011. [Electronic resource]. – Mode of access <http://www.google.com.ua/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=1&cad=rja&ved=0CEcQFjAA&url=http%3A%2F%2Fwww.combustion-institute.it%2Fproceedings%2FMCS-7%2Fpapers%2FFE%2FFE-13.pdf&ei=BNdXUpqGMvP64QSOwY-GoAg&usq=AFQjCNG4n-eqINUJys4YtAuAn1EdixuVtg&sig=6-g6YW6LsvXyP4ldwq6qCQ&bv=53899372,d.bGE>.
14. Fire Commander das Kettenfahrzeug mit modernster Löschtechnologie zur Bekämpfung von Großbränden. [Electronic resource]. – Mode of access [http://www.jungenthal-wt.de/fileadmin/www.jungenthal-wt.de/bilder-jwt/unternehmen/Prospekt\\_FireCommander.pdf](http://www.jungenthal-wt.de/fileadmin/www.jungenthal-wt.de/bilder-jwt/unternehmen/Prospekt_FireCommander.pdf)
15. iFEX – Mongoose ATV Dual Intruder System. [Electronic resource]. – Mode of access [http://www.ifexuk.com/index.php?option=com\\_content&view=article&id=66&Itemid=66](http://www.ifexuk.com/index.php?option=com_content&view=article&id=66&Itemid=66).
16. Пат. 82064 Україна, МПК (2013.01) A62C 2/00. Спосіб гасіння газового факела / Семко О.М., Український Ю.Д., Безкровна М.В., Грищина І.М., Виноградов С.А.; заявник та патенто власник Донецький національний університет, № u201212587, заяв. 05.11.2012; опубл. 25.07.2013, Бюл. № 14.
17. Akhmetov D.G. Vortex Rings / D.G. Akhmetov // Chennai: Scientific Publishing Services Pvt. Ltd. India. – 2009. – Pp. 123-129.
18. Patent FR2673978, IPC E21B35/00, A62C3/06, A62C4/00. Device for Extinguishing Oil Well Fires Without Explosives / Gilbert Chauvin, № FR19910003069 19910311, 18.09.1992.
19. Patent FR2675533, IPC E21B35/00, A62C3/00. Method and Implementation Device for Sequentially Extinguishing Surface Oil Well Fires / Louis Lescar, № FR19910005222 19910417, 23.10.1992.

### Цебрюк І.В., Виноградов С.А., Калиновський А.Я., Темников В.А. Аналіз автомобільних та інших засобів гасіння газових фонтанів, розроблення їх класифікації та індексації

Пожежі газових фонтанів є складною надзвичайною ситуацією техногенного характеру, під час гасіння яких виникає потреба залучення великої кількості сил і засобів. Такі надзвичайні ситуації призводять до значних матеріальних та екологічних втрат, а іноді й людських жертв. При цьому для гасіння пожеж газових фонтанів у різних країнах використовують різні способи і засоби.

Усі відомі засоби гасіння пожеж газових фонтанів поділено на п'ять основних груп: гасіння за допомогою доставки у факел струминного безперервного потоку вогнегасної речовини (застосування лафетних стволів, автомобілів газоводяного гасіння тощо), гасіння імпульсними установками пожежогасіння (ППП-200, Імпульс-Шторм, Fire Commander і т. ін.), застосування вибухових речовин для зриву і гасіння палаючого смолоскипа, без доставки вогнегасної речовини в зону горіння (застосування превенторів і буріння похилих свердловин) і спільне використання кількох підходів. Для кожної з груп проведено детальний аналіз всіх засобів пожежогасіння, розкрито особливості кожного з них, механізми припинення горіння, які реалізує кожен з цих способів у взаємодії з факелом.

На підставі проведеного аналізу розроблено багаторівневий класифікатор та індексатор засобів гасіння газових фонтанів, що враховує спосіб гасіння, вид вогнегасної речовини і механізм припинення горіння.

**Ключові слова:** газовий фонтан, пожежогасіння, класифікація, індексація.

### Tsebryuk I.V., Vinogradov S.A., Kalinovskiy A.Ya., Temnikov V.A. The Analysis of Automobile and other Means of Extinguishing of Gas Blowouts, Development their Classification and Indexation

Fires of gas blowouts are complex man-made emergencies, while their extinguishing there is a need to attract a large amount of energy and resources. Such emergencies entail sig-

nificant financial and environmental losses, and sometimes human sacrifices. At the same time, fire-fighting gas blowouts in different countries have different ways and means. All known extinguishing fires gas blowouts authors are divided into five main groups: the quenching via delivery Torch jet continuous flow of extinguishing agent (the use of fire monitors, car gas-quenching, etc.), fire extinguishing using fire impulse (SPT-200, Impulse-Storm, Fire Commander, etc.), the use of explosives to disrupt and extinguishing burning torch, without delivery of extinguishing agent into the combustion zone (use of preventers and drilling directional wells) and the joint use of several approaches. In-depth analysis of all fire-fighting equipment is conducted for each of the groups, the features of each of them are identified, and also the mechanisms of flame out, which implements all of these methods when interacting with a torch is described. Based on the analysis, two more methods of extinguish gas blowouts – with the delivery of extinguishing agent into the combustion zone and without the delivery, are identified. For each of the methods, a multi-level classifier and indexer, taking into account the method of extinguishing, the form of extinguishing agent and the mechanism of flame out, are developed.

**Keywords:** gas blowout, fire extinguishing, fire fighting, classifier, indexer.

УДК 536:621.1.016

Вед. науч. сотр. Н.О. Меранова, канд. техн. наук –  
Институт технической теплофизики НАН Украины

### СОВМЕСТНЫЙ АНАЛИЗ ТЕМПЕРАТУРНЫХ РЕЖИМОВ И ФАЗОВЫХ ПРЕВРАЩЕНИЙ В ПЛАЗМЕННЫХ АМОРФИЗИРОВАННЫХ ПОКРЫТИЯХ

Получено решение задачи прогнозирования объемного содержания аморфной фазы в плазменных покрытиях на базе исследования процессов теплопереноса в них и данных термокинетических диаграмм "температура-время-превращение". Изучены особенности влияния на процесс аморфизации таких факторов, как толщина напыляемых частиц, уровень их нагрева и материал основы. Представлены данные исследований, согласно которым объемное содержание аморфной фазы повышается при уменьшении толщины напыляемых частиц и увеличении коэффициента теплопроводности материала основы. Показано также, что при возрастании начальной температуры частиц выше температуры плавления материала покрытия условия аморфизации могут ухудшаться.

**Ключевые слова:** процесс теплопереноса, плазменные покрытия, термокинетическая диаграмма "температура-время-превращение", объемное содержание аморфной фазы.

**Введение.** Широкое промышленное применение плазменных покрытий из сплавов, склонных к аморфизации, обусловлено их перспективными технологическими свойствами [1-5]. Такие покрытия обладают комплексом характеристик, по уровню которых они во многом превосходят традиционные металлические материалы.

При использовании всех методов газотермического получения аморфизированных покрытий решающее значение имеет величина скорости охлаждения напыляемого материала, так как она в большой мере определяет возможность достижения аморфного состояния. Как известно, в качестве практического критерия склонности материала к аморфизации рекомендуется использовать максимальную скорость охлаждения, необходимую для предотвращения образования кристаллической фазы в количестве, поддающемся обнаружению [5].

Анализ тепловых процессов при газотермическом нанесении покрытий показывает, что каждая напыляемая частица затвердевает отдельно, не испытывая термического воздействия других частиц. Это позволяет обеспечивать вы-

сокие скорости охлаждения напыляемого материала и, соответственно, создавать условия для его аморфизации.

Таким образом, в условиях плазменного нанесения аморфных покрытий окончательный технологический результат в большой мере зависит от протекания процесса теплопереноса. При этом необходимой является организация таких температурных режимов, при которых кристаллизация расплавленных частиц была бы затруднительна. Возможность аморфизации часто оценивают по величине скорости охлаждения всего объема расплава, которую сопоставляют с ее критическим значением, необходимым для начала рассматриваемого процесса аморфизации [6]. Однако такая оценка не учитывает сложного характера процесса формирования покрытия, в частности, возможности образования наряду с аморфной фазой смешанных аморфно-кристаллических фаз, что является следствием неравномерного распределения температур и скоростей охлаждения в напыляемом слое. При прогнозировании свойств аморфизированных покрытий необходимым является определение объемных содержаний образующихся при охлаждении аморфной и кристаллической фаз [7]. Решение данной задачи может быть получено на основе совместного анализа процесса теплопереноса в покрытии и данных термокинетической диаграммы "температура-время-превращение" (ТВП-диаграммы).

**Изложение основного материала.** При прогнозировании свойств плазменных аморфизированных покрытий требуемые сведения в части их теплового состояния находились из решения задачи теплопереноса в условиях взаимодействия одиночной частицы с основой. При этом ввиду наличия в рассматриваемой ситуации существенной температурной зависимости теплофизических свойств материалов задача теплопереноса сформулирована в нелинейной постановке. Математическая модель нелинейной нестационарной задачи теплопроводности для системы "напыляемая частица-основа" представима в виде:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left( \Lambda_1 \frac{\partial \theta_1}{\partial x} \right) = C_{V1} \frac{\partial \theta_1}{\partial F_0}; \quad 0 < x < \delta_1; \quad (1)$$

$$\frac{\partial}{\partial x} \left( \Lambda_2 \frac{\partial \theta_2}{\partial x} \right) = C_{V2} \frac{\partial \theta_2}{\partial F_0}; \quad \delta_1 < x < \delta; \quad 0 < F_0 \leq F_{0k}; \quad (2)$$

$$\left[ \frac{\partial \theta_1}{\partial x} - Bi_1 \cdot \theta_1 \right]_{x=0} = Bi_1 \cdot \theta_{C1}; \quad \left[ \frac{\partial \theta_2}{\partial x} - Bi_2 \cdot \theta_2 \right]_{x=\delta} = Bi_2 \cdot \theta_{C2}; \quad (3)(4)$$

$$\Lambda_1 \frac{\partial \theta_1}{\partial x} \Big|_{x=\delta_1} = \Lambda_2 \frac{\partial \theta_2}{\partial x} \Big|_{x=\delta_1}; \quad \theta_1|_{x=\delta_1} = \theta_2|_{x=\delta_2}; \quad (5)$$

$$\theta_1|_{F_0=0} = \theta_{01}; \quad \theta_2|_{F_0=0} = \theta_{02}, \quad (6), (7)$$

где:  $\theta$  – безразмерная температура,  $\theta = t/t_{01}$ ;  $\theta_C$  – безразмерная температура окружающей среды,  $\theta_C = t_C/t_{01}$ ;  $t$ ,  $t_{01}$ ,  $t_C$  – текущая температура, начальная температура частицы и температура окружающей среды;  $\Lambda$ ,  $C_V$  – безразмерные коэффициент теплопроводности и удельная объемная теплоемкость соответственно,  $\Lambda = \lambda/\lambda_1$ ,  $C_V = c_V/c_{V1}$ ;  $\lambda$ ,  $c_V$  – коэффициент теплопроводности и удельная объем-