

## Подходы к оптимизации распределения мелкодисперсного аэрозоля при тушении пожаров термохимическим пароаэрозольным генератором

© А.Н. Бобров, А.Р. Полянский

МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, 105005, Россия

*Диверсификация производства ракетных двигателей позволяет создать новое оборудование, например термохимический пароаэрозольный генератор мелкодисперсного водяного аэрозоля для тушения пожаров. Изменение условий и целей работы ракетных двигателей определяет постановку инженерных проблем, не встречавшихся ранее. В работе приведены результаты экспериментально-теоретического исследования задачи об оптимизации распределения тушащего аэрозоля по объему помещения, которые могут быть интересны разработчикам аэрозольных систем пожаротушения.*

**Ключевые слова:** диверсификация производства ракетных двигателей, пожаротушение, теплохимический пароаэрозольный генератор.

Диверсификация производства ракетных двигателей позволяет создать высокоэффективное оборудование, например, для резки различных материалов, газопламенного напыления, пожаротушения и многих других областей использования. Однако переориентация изделий на иное применение требует проведения новых исследований, необходимость в которых вызвана изменением условий работы и целевого назначения, а также расширением диапазонов эксплуатационных параметров установок.

Перспективное направление противопожарной защиты объектов различного назначения — использование мелкораспыленной воды, диаметр капель которой составляет не более 300 мкм [1]. Все большее применение находит способ получения мелкодисперсного водяного аэрозоля посредством диспергирования перегретой воды, которая обычно готовится и хранится в специальных теплоизолированных емкостях при повышенном давлении.

Быстро и эффективно получить мелкодисперсный водяной аэрозоль можно в термохимическом пароаэрозольном генераторе (ТПАГ) (патент РФ № 2036674), созданном на кафедре «Ракетные двигатели» МГТУ им. Н.Э. Баумана. Его работа основана на прямой химической реакции активного состава с водой, приводящей к ее перегреву и вскипанию на выходе из сопла генератора.

Проведенный анализ дисперсности водяного аэрозоля, генерируемого ТПАГ, показал, что среднемедианный диаметр капель изменяется в диапазоне значений 50...250 мкм в зависимости от давления в камере ( $p_k = 1,0...0,5$  МПа) и массового соотношения расходов воды и активного состава ( $K_m = 5...15$ ). Форма кривой распределения капель по размерам и дисперсность аэрозоля схожи с аналогичными показателями, получаемыми при распаде струй перегретой воды. Это может быть объяснено тем, что процессы дробления в ТПАГ в значительной степени определяются механизмом вскипания капель перегретой воды. При работе ТПАГ образуется струя аэрозоля, содержащая газообразные, жидкие и твердые продукты, оказывающие комбинированное тушащее воздействие, включающее:

- резкое уменьшение поступления паров горючего в зону пламени вследствие охлаждения горячей поверхности струей аэрозоля;
- отбор теплоты в зоне пламени в результате испарения мелких капель воды и нагрева других продуктов (газа, твердых частиц);
- торможение горения вследствие возможного ингибирующего воздействия и разбавления горючего и окислителя продуктами, содержащимися в тушащей струе ТПАГ;
- механический сдув пламени (нарушение стадийности горения) струей ТПАГ.

Поскольку вклад отдельных составляющих в совокупный тушащий эффект выявить трудно, основным методом оптимизации процесса пожаротушения с помощью ТПАГ стало экспериментальное исследование гашения модельных очагов горения при различных режимах работы генератора. Эффективность тушения определяется расходом активного состава, используемого для перегрева воды, и размерами зоны тушения.

Эксперименты по тушению с помощью ТПАГ [2] продемонстрировали достаточно высокую эффективность тушения модельных очагов горения и указали на возможность значительного повышения эффективности тушения на основе оптимизации распределения аэрозоля. Варьируя режимами работы, числом ТПАГ и конструкцией сопел (геометрией истекающих струй), можно генерировать потоки аэрозоля различной интенсивности и с разной продолжительностью подачи, подбирая их применительно к размерам помещения и типу ожидаемого возгорания. Эта оптимизационная задача не возникает при отработке генераторов и ракетных двигателей и связана исключительно с новой областью конверсионного применения аэрозольного парогенератора в качестве средства пожаротушения.

Для решения задачи была разработана упрощенная методика оценки зон надежного гашения струями тушащего аэрозоля в различных зонах помещений произвольной формы. Эта методика позво-

ляет находить оптимальные геометрические параметры сопловых устройств для подачи аэрозоля и место их размещения в защищаемом от пожара помещении. В основу методики положены интегральные закономерности теории турбулентных струй.

Двухфазные струи, состоящие из смеси газа и твердых частиц или капель жидкости, встречаются в различных областях техники (например, топливные факелы, создаваемые форсунками разных типов в камерах сгорания реактивных двигателей и промышленных топках, струи пульверизационных краскораспылителей, пескоструйных аппаратов и др.). Прогресс, достигнутый в описании сложных одно- и двухфазных струйных течений, для которых выведены соответствующие интегральные соотношения, позволяет находить поля распределения скоростей, температур и концентраций примесей с помощью простых алгебраических соотношений. Согласно теории турбулентных струй [3–5], профили относительных скоростей и концентрации можно считать подобными и описывать с помощью формул Шлихтинга:

$$\frac{u}{u_m} = (1 - \eta_u^{3/2})^2, \quad \frac{\gamma}{\gamma_m} = (1 - \eta_m^{3/2})^2; \quad (1)$$

$$\eta_u = r/\delta_u, \quad \eta_\gamma = r/\delta_\gamma, \quad (2)$$

где  $u_m$ ,  $\gamma_m$  — скорость и концентрация на оси потока;  $r$ ,  $\delta_u$ ,  $\delta_\gamma$  — соответственно текущая радиальная координата и границы профиля струи по скорости и концентрации.

Тушащий эффект струи ТПАГ определяется не только концентрацией тушащего аэрозоля, но и механизмами поперечного турбулентного переноса в струе (зависящего от осредненной скорости потока), который обеспечивает проникание мелких частиц аэрозоля в зону реакции и к поверхности газификации горючего и ее конвективное охлаждение. Учитывая комплексный характер тушащего эффекта, при построении упрощенной методики размеры зон тушения было решено оценивать по профилю скорости.

Параметры вдоль струи потока, согласно [3–5], описываются зависимостями вида

$$u_m = \frac{Au_0r_0}{x}, \quad (3)$$

где  $A$  — числовой параметр, зависящий от характерного участка струи (для основного участка можно принять  $A = 12,4$ );  $x$  — осевая координата от среза сопла;  $r_0$  — радиус сопла;  $u_0$  — скорость истечения струи.

На рис. 1 и 2 приведены рассчитанные на основании интегральных соотношений по формулам (1)–(3) профили осредненных осевых скоростей газа в затопленной струе с одинаковой начальной скоростью 280 м/с при разных начальных радиусах струи  $r_0$ , равных 5 и 3,1 мм. Расчет начальной скорости истечения продуктов реакции термохимического состава с водой в атмосферу проводился с использованием программного комплекса ТЕРРА [5–8]. Давление в камере ТПАГ составляло  $p_k = 8$  МПа, массовое соотношение расхода воды и термохимического состава  $K_m = 8$ . Зоны с одинаковой скоростью образуют поверхность, по форме близкую к сигарообразной. (На всех рисунках линейные размеры приведены в метрах.)

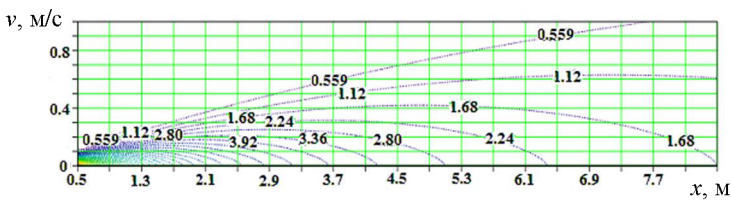


Рис. 1. Осредненные осевые скорости при  $r_0 = 5$  мм

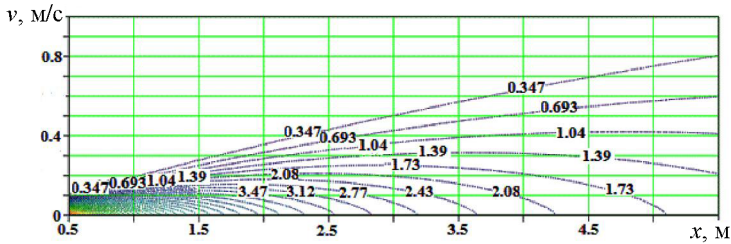


Рис. 2. Осредненные осевые скорости при  $r_0 = 3,1$  мм

При проведении экспериментальной отработки тушения модельных очагов на плоскости пароаэрозольной струей ТПАГ располагался на высоте  $h \approx 2,7$  м, его ось была направлена под углом  $30^\circ$  к горизонтальной плоскости.

На рис. 3 в плоскости  $z_1Ox_1$  показана схема пересечения струи с поверхностью, на которой расположены очаги пожара (ее след в виде жирной линии обозначен цифрой 1). На схеме ось симметрии струи (штрихпунктирная линия 2) направлена горизонтально, как на рис. 2. Рассматривая линии равной скорости (см. рис. 2) как тела вращения, можно найти и пересечение с плоскостью 1 (см. рис. 3), и получить поле распределения скоростей в плоскости  $x_1Oy_1$ , и совместить его со схемой расположения модельных очагов пожара. Характерный вид линий пересечения показан на рис. 4. Цифры соответствуют различным значениям продольных скоростей газа (м/с).

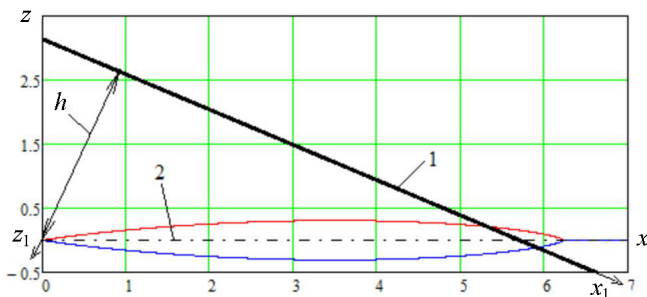


Рис. 3. Схема пересечения струи ТПАГ с плоской поверхностью

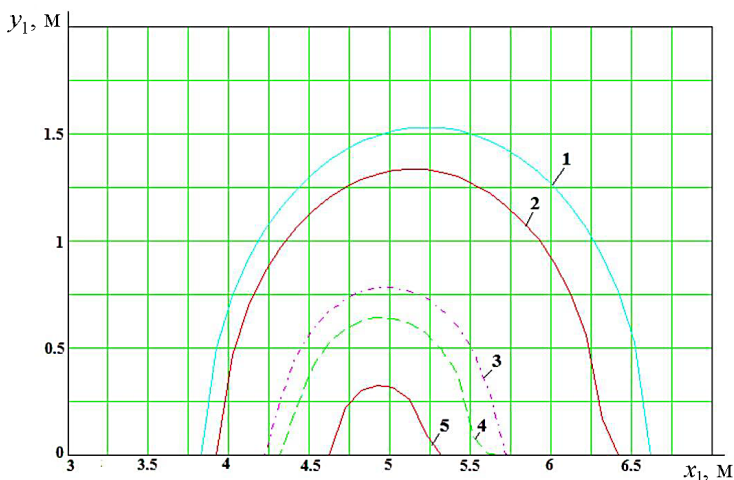


Рис. 4. Поле осредненных осевых скоростей в плоскости тушения

При сопоставлении зоны гашения модельных очагов горения (плошки с керосином диаметром около 70 мм), расположенных вокруг точки пересечения оси струи ТПАГ с шагом около 0,3 м, с рассчитанным полем осредненных осевых скоростей в плоскости тушения было экспериментально определено, что ее размеры соответствуют скорости 2 м/с (при указанном режиме работы ТПАГ).

Приняв эту скорость за границу гашения струей ТПАГ, можно, например, рассчитать ожидаемые размеры (в метрах) зон тушения струями с равной начальной скоростью для сопел двух разных диаметров (рис. 5).

Учитывая, что при работе ТПАГ скорость истечения постоянна при фиксированном составе продуктов сгорания  $K_m = \text{const}$  и давлении в камере  $p = \text{const}$ , которое зависит только от суммарной площади сопел [9], можно управлять распределением тушащего аэрозоля посредством изменения числа и расположения сопел ТПАГ. Поскольку дальнобойность струй весьма велика (см. рис. 5), то для ряда

помещений оказывается эффективным использование узлов выброса аэрозоля с несколькими соплами разного диаметра. На рис. 6 показан сопловой насадок с семью соплами, одно из которых расположено вдоль оси ТПАГ, а остальные шесть — с наклоном к оси, равномерно по окружности определенного радиуса.

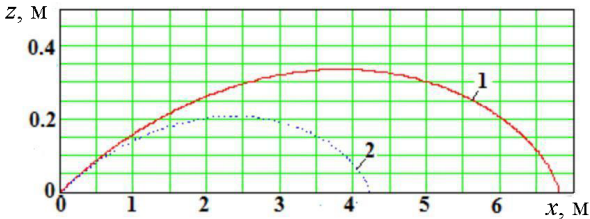


Рис. 5. Зоны тушения соплами разного диаметра:  $r_0 = 5$  мм (1);  $r_0 = 3,1$  мм (2)

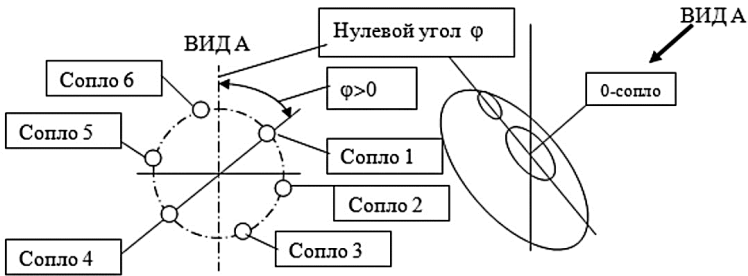


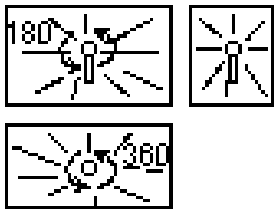
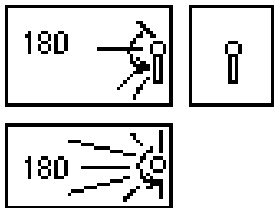
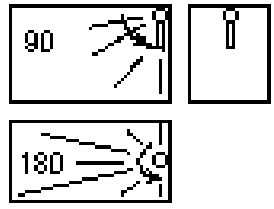
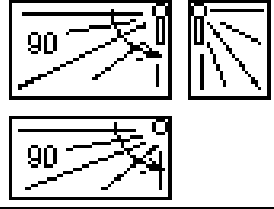
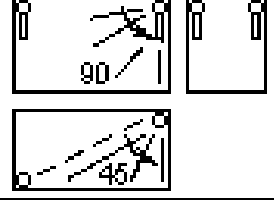
Рис. 6. Схема соплового насадка с семью соплами

Расстояние между осями сопел не должно быть слишком малым, иначе могут проявляться эффекты взаимодействия струй. При расположении сопел на расстоянии менее восьми диаметров истечение системы струй может происходить по единой траектории (независимо от диаметра струй, входящих в систему). На больших расстояниях взаимовлияние струй ослабевает.

Для организации тушения в помещении представляется разумным распределить всю смесь равномерно по объему помещения с использованием первичных струй ТПАГ, что гарантирует высокие концентрации фракций аэрозоля и максимальную наведенную степень турбулентности, обеспечивающую возможность проникания капель за экраны (эффект объемного тушения).

В таблице приведены оценки потребного числа сопел ТПАГ и их среднего диаметра (при сохранении суммарной площади критического сечения сопел ТПАГ, соответствующей  $d_{кр} = 20$  мм), необходимые для защиты всех секторов в кубическом помещении объемом  $50 \text{ м}^3$  при различных схемах расположения ТПАГ.

### Влияние угла раскрытия струи и расположения ТПАГ на потребное число сопел и их средний диаметр

Возможная схема расположения ТПАГ	Сектор защиты одним ТПАГ в плоскостях $xu$ и $zy$ , град	Угол раскрытия струи			
		12°		15°	
		Число струй	Средний диаметр сопла	Число струй	Средний диаметр сопла
	360×180	450	0,94	288	1,18
	180×180	225	1,33	144	1,67
	90×180	112,5	1,89	72	2,36
	90×90	56,3	2,67	36	3,33
	45×90	28,1	3,77	18	4,71

Из анализа данных таблицы следует, что обеспечение равномерного распределения аэрозоля достигается при достаточно большом числе сопел. Сравнивая схемы расположения ТПАГ, можно увидеть, что оптимально размещать их в угловой части бокса, это делает

сектор охвата струй минимальным и сокращает потребное число выпускных сопел. Наиболее оптимальным представляется расположение корпуса ТПАГ вне помещения, а выпускных сопел — ближе к углам помещения.

## ЛИТЕРАТУРА

- [1] *Пожарная безопасность — история, состояние, перспективы. Матер. XIV Всерос. науч.-практ. конф.* Москва, ВНИИПО, 1997, ч. 2, 326 с.
- [2] Щербаков А.А., Власов Ю.Н., Бойко И.В. Результаты использования мелкодисперсного пароводяного аэрозоля для гашения пожаров. *Тез. докл. республиканской науч.-техн. конф. «Процессы горения и охрана окружающей среды»*. Рыбинск, 1992, с. 120.
- [3] Абрамович Г.Н. *Теория турбулентных струй*. Москва, Физматгиз, 1960, 715 с.
- [4] Гиршович Т.А. *Турбулентные струи в поперечном потоке*. Москва, Машиностроение, 1993, 256 с.
- [5] Ватолин Н.А., Моисеев Г.К., Трусов Б.Г. *Термодинамическое моделирование в высокотемпературных неорганических системах*. Москва, Металлургия, 1994, 352 с.
- [6] Трусов Б.Г. Моделирование кинетики химических превращений: термодинамический подход. *Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Естественные науки*, 2005, № 3, с. 26–38.
- [7] Трусов Б.Г. Программная система моделирования фазовых и химических равновесий при высоких температурах. *Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Приборостроение*, 2012, № 2 (спецвып.): Программная инженерия, с. 240–249.
- [8] Дорофеев А.А. *Основы теории тепловых ракетных двигателей. (Общая теория ракетных двигателей)*. Москва, Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2010, 464 с.

Статья поступила в редакцию 15.07.2013

Ссылку на эту статью просим оформлять следующим образом:

Бобров А.Н., Полянский А.Р. Подходы к оптимизации распределения мелкодисперсного аэрозоля при тушении пожаров термохимическим пароаэрозольным генератором. *Инженерный журнал: наука и инновации*, 2013, вып. 4.

URL: <http://engjournal.ru/catalog/machin/rocket/704.html>

**Бобров Александр Николаевич** родился в 1961 г.; окончил МВТУ им. Н.Э. Баумана в 1984 г.; канд. техн. наук, доцент кафедры «Ракетные двигатели» МГТУ им. Н.Э. Баумана; область научных интересов — рабочие процессы в ракетных двигателях. e-mail: alexbobr@mail.ru

**Полянский Александр Ромилович** родился в 1949 г.; канд. техн. наук, доцент кафедры «Ракетные двигатели» МГТУ им. Н.Э. Баумана; область научных интересов — исследования газовой динамики ракетных двигателей. e-mail: korolev100-rd@mail.ru