

## СПОСОБ ГЕНЕРАЦИИ ХОЛОДНЫХ ГАЗОВ В ТВЕРДОТОПЛИВНЫХ ГАЗОГЕНЕРАТОРАХ

В. А. Шандаков, В. Н. Пузанов, В. Ф. Комаров, В. П. Борочкин

Федеральный научно-производственный центр «Алтай», 659322 Бийск

Описан принцип работы газогенератора, заключающийся в сжигании пористого заряда твердого топлива в режиме фильтрации газообразных продуктов сгорания к холодному торцу, в направлении перемещения фронта горения.

В различных областях техники широко используются сжатые газы: для накачки емкостей и оболочек, приведения в действие различных механизмов, распыления красок, вытеснения жидкостей и т. д. Расширение применения пневматических устройств ограничено тем, что для получения сжатых газов, в том числе и воздуха, требуются специальные устройства (баллоны с редукторами, компрессоры), использование которых иногда нецелесообразно ввиду их значительных габаритов и масс, а иногда и вообще невозможно из-за необходимости подвода энергии для приведения их в действие. Особенно это касается техники, предназначенной для работы в экстремальных ситуациях, например при ликвидации последствий аварий, стихийных бедствий, экологических катастроф.

Существуют уникальные источники сжатых газов — пороха. Автономность, компактность, большие потенциальные запасы газов в небольших объемах конденсированного вещества делают их незаменимыми при решении ряда задач. Однако высокая температура газообразных продуктов сгорания ограничивает их применение в народном хозяйстве, поскольку не все материалы способны выдерживать такую температуру.

В связи с изложенным проблема создания низкотемпературных порохов стояла перед исследователями давно, однако ее решение противоречило основным законам горения конденсированных систем: тепла в конденсированную систему должно быть передано не менее, чем необходимо для ее газификации.

В 70–80-е годы при разработке рецептов низкотемпературных твердых топлив было установлено, что компоновка их по традиционной схеме «окислитель — горючее» не позволяет получить устойчивое горение композиции с температурой продуктов сгорания ниже

1000 ÷ 1400 К при любых соотношениях компонентов (состав либо горит с относительно высокой температурой, либо вообще не горит).

Для получения газов с низкой температурой было предложено дополнительно охлаждать продукты горения твердыми химическими охладителями [1, 2]. В зависимости от природы охладителя можно получать температуру газа на выходе из газогенератора в пределах 380 ÷ 650 К. Принципиальная схема такого устройства представлена на рис. 1.

Недостатки этого способа — большие габариты газогенераторов, связанные с наличием блока охлаждения, а также со значительным (более 50% по объему) количеством конденсирующихся ( $H_2O$ ) и водорастворимых ( $NH_3$ ) составляющих газа. Кроме того, генерируемые продукты горения пожароопасны в смеси с воздухом из-за большого содержания горючих газов ( $H_2$ ,  $CH_4$ ,  $CO$ ). Все это затрудняет их использование в системах, где требуются низкая температура, длительное поддержание повышенного давления наддува, пожаро- и взрывобезопасность в смеси с воздухом в любых концентрациях, например в системах аварийного спасения (надувные трапы, плоты, спасатель-

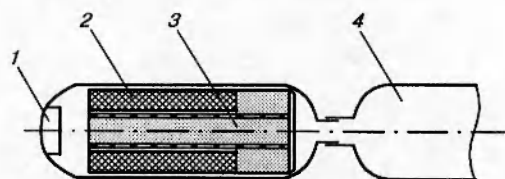


Рис. 1. Схема газогенератора с охладителем:

1 — воспламенитель, 2 — монолитный заряд, 3 — химический охладитель, 4 — наддуваемая емкость

ные жилеты и т. д.).

В 80-е годы теоретически и экспериментально была подтверждена возможность создания низкотемпературных твердых топлив для получения холодных ( $T < 373$  К) газов различного состава. Для газогенераторов азота получены зависимости параметров горения от рецептурных и структурных характеристик топлива и заряда.

В работах [3–5] показана возможность существования стационарной волны горения в пористой реагирующей среде химических источников чистых газов при теплообмене газообразных продуктов реакции с исходным веществом. Отмечено, что фильтрация теплоносителя через реагирующую среду в направлении распространения фронта реакции приводит к локальному перегреву зоны горения относительно адиабатической температуры горения. Это открывает путь для сжигания без дополнительных энергозатрат низкокалорийных составов, в том числе не способных к обычному горению в адиабатических условиях. Действительно, экспериментальные исследования режимов горения кислородгенирующих пиротехнических составов на основе хлората натрия, заряды из которых представляли собой набор гранул и таблеток, показали возможность достижения в зоне горения температуры  $T = 1030$  К, превышающей адиабатическую температуру сгорания состава ( $T = 790 \div 830$  К).

Перераспределение энергии между газообразными и конденсированными продуктами сгорания позволяет получать низкотемпературные газы, достаточно разнообразные по составу.

Поскольку при горении пористых систем в режиме спутной фильтрации в направлении распространения фронта горения конвективный поток тепла существенно превышает кондуктивный, уравнение для температуры газа  $T$  в пористой среде в одномерной постановке можно записать в виде

$$c_0 \frac{\partial T}{\partial \tau} = -G_* \frac{\partial T}{\partial x}, \quad (1)$$

где  $c_0$  — объемная теплоемкость пористой среды;  $G_* = Gc$ ,  $G$  — удельный массовый расход,  $c$  — удельная теплоемкость газа;  $\tau$  — время;  $x$  — координата.

Если температура газа на входе в пористую среду и время связаны зависимостью  $T_0(\tau)$  и в начальный момент времени распределение температуры среды по координате опре-

деляется зависимостью  $T_0(x)$ , то уравнение (1) имеет следующее решение:

$$T(\tau, x) = \begin{cases} T_0(\tau - c_0 x / G_*), & \tau > c_0 x / G_*, \\ T_0(x - \tau G_* / c_0), & \tau < c_0 x / G_*. \end{cases} \quad (2)$$

Из формулы (2) вытекает, что любое возмущение температуры распространяется вдоль пористого тела со скоростью  $v_c = G_*/c_0$ . Если скорость распространения тепловой волны меньше скорости горения состава  $u$ , то газ перед фронтом горения остается холодным. Параметр  $v_c/u$  зависит от рецептурных и структурных характеристик пористого заряда твердого топлива. Для пор или гранул достаточно крупного размера результаты начинают зависеть от их размера. В этом случае следует использовать более сложную «двухтемпературную» модель [6].

Эксперименты по измерению профиля температур по оси заряда азотгенирующего топлива различных рецептур показали, что охлаждение газа практически до начальной температуры заряда происходит на расстоянии  $3 \div 15$  мм от фронта горения.

Для поиска рецептур топлива и определения характеристик горения были изготовлены газогенераторы диаметром  $20 \div 160$  мм, принципиальная схема которых представлена на рис. 2. Газообразные продукты, образующиеся при горении заряда, проходят через его несгоревшую часть, фильтр, сопло и поступают в емкость. При этом газ, проходя через пористую часть заряда, охлаждается и фильтруется, мелкие капли конденсата сепарируются, а основная масса конденсата остается за фронтом горения. Механический фильтр предотвращает выход конденсированных продуктов сгорания, когда передний фронт горения подходит к концу заряда.

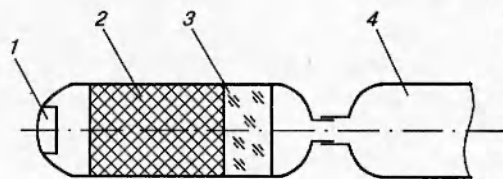


Рис. 2. Схема газогенератора с пористым зарядом: 1 — воспламенитель, 2 — пористый заряд, 3 — фильтр, 4 — наддуваемая емкость

Влияние пористости зарядов на параметры горения

| Параметры                                     | Значения параметров в сериях |          |            |            |
|---|------------------------------|----------|------------|------------|
|   | 1                            | 2        | 3          | 4          |
| Пористость                                    | 0,588                        | 0,516    | 0,469      | 0,371      |
| Масса заряда, г                               | 610–670                      | 764      | 916        | 1031       |
| Плотность заряда, г/см <sup>3</sup>           | 0,786                        | 0,924    | 1,015      | 1,201      |
| Длина заряда, мм                              | 122–134                      | 130      | 142        | 135        |
| Толщина фильтра, мм                           | 28–16                        | 20       | 8          | 15         |
| Давление в камере, МПа                        | 3,4–5,0                      | 6,1–8,2  | 5,6–8,2    | 6,2–9,6    |
| Перепад давления по длине заряда, МПа         | 2,3–3,7                      | 3,5–4,9  | 3,6–5,1    | 3,2–4,6    |
| Температура газов за фильтром, К              | 293                          | 293–305  | 293–303    | 264–300    |
| Средняя удельная газопроизводительность, л/кг | 403 ± 16                     | 403 ± 16 | 403 ± 16   | 403 ± 16   |
| Скорость горения, мм/с                        | 102 ± 10                     | 70,7 ± 7 | 55,4 ± 5,8 | 30,2 ± 9,1 |

Типичный характер изменения параметров в процессе горения пористого заряда приведен на рис. 3. Первые максимумы  $p_k(\tau)$  и  $p_\phi(\tau)$  (в камере и за фильтром) обусловлены воспламенителем, вторые максимумы связаны с забиванием фильтра конденсированными продуктами сгорания и с подходом переднего фронта горения к концу заряда с последующим уменьшением поверхности горения гранул (медленный спад давления).

В качестве модельной композиции для определения закономерностей горения использовали азотгенерирующий состав, включающий азид натрия, фторид лития, фенолформальдегидное связующее. Из этого состава изготавливали пористые заряды. Результаты экспериментов, представленные в таблице, пока-

зали, что изменением пористости в диапазоне  $0,37 \div 0,59$  можно изменять скорость горения в интервале  $30 \div 100$  мм/с. При этом температура газа за фильтром не превышает 300 К, а в некоторых случаях (при начальной температуре заряда 275 К) — ниже этого значения.

Аппроксимацией экспериментальных данных по результатам 24 испытаний при фиксированной пористости  $\xi$  получено (с коэффициентом корреляции 0,967), что  $u$  [мм/с] =  $413,87\xi^{2,655}$ .

Температура фронта горения, определенная в ряде экспериментов, достигала 870 К при расчетном значении сверхадиабатической температуры горения 923 К, найденной в предположении, что газообразные продукты реакции имеют температуру, равную начальной температуре заряда, а все тепло, выделяемое при горении, расходуется на нагрев конденсированной фазы. При этом расчетное значение адиабатической температуры горения 671 К. Непосредственное измерение температуры в переднем объеме газогенератора показывает значительно меньшее значение, что, вероятно, связано с теплоотдачей в стенки генератора.

Изменением рецептуры топлива при фиксированной пористости можно управлять скоростью горения в достаточно широком диапазоне. Ниже приведены значения относительной скорости горения  $Z = u/u_0$  при вариации соотношения долей азиды натрия и фторида лития при заданной пористости ( $\xi = 0,47$ ):

|                             |       |       |       |       |
|-----------------------------|-------|-------|-------|-------|
| $\text{NaN}_3 / \text{LiF}$ | 75/20 | 72/23 | 78/17 | 81/14 |
| $Z$                         | 1,0   | 0,93  | 1,13  | 1,25  |

Скорость горения пористых систем, в отличие от горения топлив в обычном режиме, слабо зависит от диаметра сопла при заданных габаритах топливного заряда. Это связано

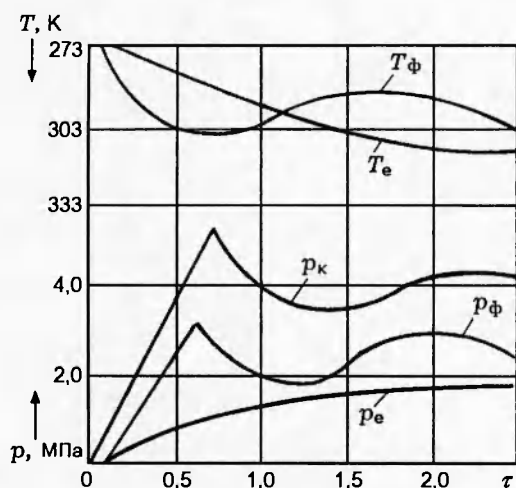


Рис. 3. Зависимости давления в камере ( $p_k$ ), давления за фильтром ( $p_\phi$ ,  $T_\phi$ ) и в наддуваемой емкости ( $p_e$ ,  $T_e$ ) от времени

с тем, что при уменьшении диаметра горла сопла давление в зоне горения возрастает, что увеличивает скорость горения отдельных гранул, а перепад давления уменьшается, ослабляя тем самым конвективный теплообмен и снижая скорость распространения переднего фронта горения. Суперпозиция этих факторов приводит к постоянству массового расхода газа.

То же самое относится и к влиянию температуры заряда. Скорость горения остается практически постоянной при значениях начальной температуры  $223 \div 323$  К. Изменяется только температура генерируемого газа.

Экспериментально определенным объемный состав газов в азотгенерирующих композициях различных рецептов включает  $96 \div 99\%$   $N_2$ ,  $1 \div 4\%$   $H_2 + CH_4$  и менее  $0,05\%$   $NH_3$ , т. е. генерируемый газ не способен образовывать пожаро- и взрывоопасную смесь с воздухом.

Таким образом, показана возможность создания низкотемпературных генераторов различных газов, которые образуются при сжигании пористых зарядов твердого топлива в режиме спутной фильтрации газообразных продуктов сгорания через несгоревшую часть заряда в направлении перемещения фронта горения. Получены экспериментальные зависимости параметров горения от некоторых рецептурных и структурных характеристик.

## ЛИТЕРАТУРА

1. **Разработка** опытных образцов ряда низкотемпературных газогенераторов с длительным временем работы для газовой промышленности: Отчет НПО «Алтай» / Г. Ю. Шейтельман, В. А. Шандаков, В. П. Борочкин и др. Инв. 1798-О. 1989.
2. **Опытно-конструкторская** отработка элементов снаряжения к ГГ комплекса дублирующего дистанционного управления кранами газовых магистралей: Научно-техн. отчет НПО «Алтай» / Н. А. Макаровец, Г. Ю. Шейтельман, В. А. Шандаков и др. Инв. 1071-О. 1981.
3. **Алдушин А. П., Склярский Б. С.** Распространение волны экзотермической реакции в пористой среде при продуве газа // Докл. АН СССР. 1978. Т. 241, № 1.
4. **Алдушин А. П.** Теплопроводностный и конвективный режимы горения пористых систем при фильтрации теплоносителя // Физика горения и взрыва. 1990. Т. 26, № 2. С. 60–68.
5. **Алдушин А. П., Звиненко К. И.** Горение пиротехнических смесей в условиях теплообмена с газообразными продуктами реакции // Физика горения и взрыва. 1991. Т. 27, № 6. С. 56–60.
6. **Лаевский Ю. М., Бабкин В. С.** Фильтрационное горение газов // Распространение тепловых волн в гетерогенных средах / Под ред. Ю. Ш. Матрос. Новосибирск: Наука, 1988.

*Поступила в редакцию 16/IV 1998 г.*