

ОЦЕНКА УСЛОВИЙ ГАШЕНИЯ ВОЛН ГОРЕНИЯ ПЫЛЕВЫМИ И ВОДЯНЫМИ ЗАВЕСАМИ

А.А. Васильев, В.А. Васильев

*Институт гидродинамики им. М.А.Лаврентьева СО РАН
Новосибирский государственный университет
630090, Новосибирск, Россия*

Известно, что внешний инициатор может возбудить в горючей смеси фронт горения, способный самостоятельно распространяться по смеси за счет химического энерговыделения Q . Минимальная скорость распространения присуща ламинарному пламени (см/сек), ведомому теплопроводностью и диффузией. Автотурбулизация фронта горения способствует увеличению скорости и переходу к режиму турбулентного горения с характерными скоростями на уровне десятков м/сек. При этом фронт ускоряющегося пламени генерирует уходящие вперед волны сжатия. Итогом такого ускорения может стать переход горения во взрыв с образованием ударной волны (УВ). Такой механизм чаще всего реализуется при аварийных воспламенениях метано-воздушной смеси в условиях шахт. Нормативным документом РФ (ГОСТ Р 54777 – 2011) для гашения взрыва рекомендуется концентрация огнетушащего порошка в диапазоне от 0.01 до 0.1 кг/м³ в облаке порошка длиной не менее 15 м! К сожалению, несмотря на нормативные рекомендации аварийные возгорания в шахтах происходят и в наше время. Потому проблема борьбы с шахтными взрывами остается актуальной и очень важной, поскольку аварийные взрывы кроме огромных разрушений приводят к человеческим жертвам.

Известно много способов борьбы с волнами горения, направленные на их ослабление и гашение: например, впрыск ингибиторов (химическое воздействие), инъекция инертных газов (выход за концентрационные пределы), создание на пути волны пылевых или водяных завес, и т.д. Опубликованы десятки статей с попытками моделировать шахтные взрывы в рамках моделей гетерогенных сред. К сожалению, известные численные расчеты описывают динамику ускорения пламени и ослабления взрывной волны при ее взаимодействии с пылевыми завесами лишь на качественном уровне, заметно отличаясь от динамических параметров реальных взрывных волн. В данной статье предпринята попытка сосредоточить внимание на критериях полного гашения волн горения. Представлены простейшие оценки для метано-воздушных смесей.

Рассмотрим по отдельности случаи подавления волн горения при взаимодействии с пылевыми и водяными завесами.

Типичные скорости ламинарного пламени примерно на два-три порядка меньше скорости звука исходной смеси, потому конечное состояние продуктов такого горения практически не отличается от случая сгорания смеси, когда давление продуктов не меняется в результате химической реакции (это наиболее вероятно для начальной стадии воспламенения метано-воздушной смеси). Для оценок условий гашения пламени можно предположить, что процесс расширения происходит очень медленно и вся химическая энергия трансформируется в тепловую, без кинетической.

Возьмем объем горючей смеси V_0 , тогда запас химической энергии смеси равен произведению массы смеси на удельное энерговыделение q : $E = \rho_0 V_0 \cdot q$ (размерность энергии E – кал (или Дж), плотности ρ – кг/м³, q – кал/кг или Дж/кг). Для оценок можно считать, что для топливно-воздушных смесей молекулярная масса продуктов реакции μ незначительно отличается от μ_0 исходной смеси. Потому сгорание смеси в режиме

$P = const = P_0$ с увеличением температуры продуктов должно приводить к пропорциональному уменьшению плотности смеси в соответствии с уравнением состояния идеального газа $P = \rho RT / \mu$ за счет расширения объема продуктов реакции. Рассматриваемая масса не меняется, потому $\rho_0 V_0 = \rho V = M_{gas}$. При этих представлениях в конечном состоянии мы имеем нагретые продукты реакции в объеме, превышающем начальный объем во столько раз, во сколько температура продуктов превышает начальную температуру смеси.

Из такого представления легко формулируется условие гашения – в такой объем нагретых продуктов необходимо внести столько мелкодисперсных пылевых частиц суммарной массой $M_{powder} \equiv M_{pow}$, чтобы они при нагревании забрали на себя почти всю тепловую энергию продуктов (Рис.1). Чтобы исключить возможность воспламенения свежей смеси за пылевым облаком следует ограничить нагрев пылевых частиц температурой, равной температуре вспышки смеси T_{ign} (ignition). Это условие запишется в следующем виде:

$$M_{gas} \cdot q = M_{pow} c_p (T_{ign} - T_0), \text{ откуда} \\ M_{pow} / M_{gas} = q / [c_p (T_{ign} - T_0)]. \quad (1)$$

Для метано-воздушных смесей при режиме сгорания $P = const = P_0$ величина $q = 625$ кал/г (для стехиометрии), температура вспышки $T_{ign} = 460$ °К, удельная теплоемкость для традиционно используемых пылей $c_p \approx 0.25$ кал/(г·град), тогда для стехиометрической смеси из (1) получаем

$$M_{pow} / M_{gas} \approx 625 / [0.25(460 - 300)] \approx 15.6 .$$

Конечное состояние продуктов горения стехиометрической смеси в режиме $P = const$ характеризуется температурой $T_p = 2224$ °К, молекулярной массой $\mu_p = 27.43$ г/моль ($\mu_0 = 27.64$ г/моль), плотностью $\rho_p / \rho_0 = (T_0 / T_p) \cdot \mu / \mu_0 \approx 0.15$. Тогда $\rho_p \equiv \rho_{gas} \approx 0.15 \rho_0 \approx 0.15 \cdot 1.1295 \approx 0.169$ кг/м³ и $\rho_{pow} \approx 15.6 \rho_{gas} \approx 2.6$ кг/м³.

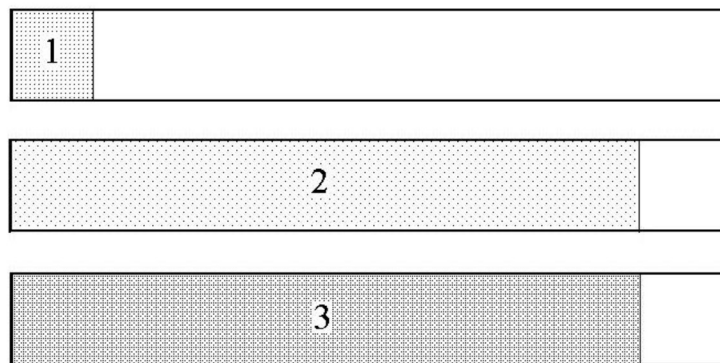


Рис.1. Идеализированная схема гашения низкоскоростного пламени:
1 – исходная горючая смесь; 2 – расширившиеся продукты сгорания при режиме $P = const = P_0$;
3 – продукты реакции совместно с пылевыми (или водными) частицами.

Если в штреке постоянного сечения S характерный размер исходной горючей смеси (индекс 1 на Рис.1) обозначить L_0 , то размер пылевого облака (3 на Рис.1) $L = L_0 \cdot \rho_0 / \rho \approx 1.13/0.17 \cdot L_0 \approx 6.6 \cdot L_0$. Если размер облака исходной смеси выражать в диаметрах штрека d ($L_0 = nd$), то $L = 6.6 \cdot nd$. Чем больше размер облака исходной горючей смеси, тем больше должна быть длина пылевой завесы для гашения аварийного возгорания этой смеси.

Следует еще раз подчеркнуть, что при меньших соотношениях масс и плотностей пылевой завесы продукты реакции будут иметь температуру, превышающую температуру воспламенения смеси, т.е. завеса не выполнит основное свое предназначение – полное гашение очага возгорания – и горючая смесь за завесой может вновь воспламениться и повторить сценарий развития взрыва. Например, если в качестве граничной температуры взять более высокую температуру самовоспламенения (self-ignition) $T_{S-I} = 810$ °К, то $M_{pow} / M_{gas} \approx 625 / [0.25(810 - 300)] \approx 4.9$, или $\rho_{pow} \approx 4.9 \rho_{gas} \approx 0.83$ кг/м³. Кажущийся «выигрыш» по плотности (в 3 раза) многократно увеличивает вероятность самовоспламенения смеси и повторного развития взрыва за завесой.

Если вместо пыли использовать мелкораспыленную воду, то уравнение теплового баланса будет включать нагрев воды до температуры кипения, фазовый переход жидкости в пар и последующий разогрев пара до температуры воспламенения:

$$M_g q = M_{lq} (c_P)_{lq} (T_{vap} - T_0) + M_{lq} \lambda + M_{lq} (c_P)_{vap} (T_{ign} - T_{vap}).$$

Здесь M_{lq} – масса воды в завесе, $(c_P)_{lq} = 1$ кал/(г·град) – удельная теплоемкость воды, $T_{vap} = 373$ °К – температура кипения воды, $\lambda \approx 540$ кал/г – удельная теплота парообразования, $(c_P)_{vap} \approx 0.51$ кал/(г·град) – удельная теплоемкость водяного пара (при температуре 100 °С; при нагреве до 460 °К теплоемкость возрастает до 0.68 кал/(г·град)). Из последнего уравнения получаем

$$M_{lq} / M_{gas} = q / [(c_P)_{lq} (T_{vap} - T_0) + \lambda + (c_P)_{vap} (T_{ign} - T_{vap})] \approx 650 / [75 + 540 + 0.6 \cdot 87] \approx 1, \quad (2)$$

т.е. примерно одинаковую массу воды и горючей смеси, $\rho_{lq} \approx 0.17$ кг/м³. За короткие времена взаимодействия продуктов детонации с каплями воды трудно ожидать, что они успеют испариться и нагреться, потому если исключить фазовый переход вода → пар и последующий нагрев пара, то

$$M_{lq} / M_{gas} \approx q / [(c_P)_{lq} (T_{vap} - T_0)] \approx 650 / 75 \approx 8.7, \quad (3)$$

т.е. требуется почти на порядок большая величина – $\rho_{lq} \approx 1.5$ кг/м³. Если воду не нагревать до кипятка, то ее количество должно быть увеличено (например, при нагреве до 50 °С нужно утроить количество воды до величины $\rho_{lq} \approx 4.5$ кг/м³).

Следует особо подчеркнуть, что вышеприведенная оценка относится к «очень медленному» горению, когда движением газа и его кинетической энергией можно пренебречь. Другими словами, приведенная оценка дает минимальные концентрации, которые смогут обеспечить гашение волны медленного горения. Любые устройства, где эти величины оказываются меньшими, не являются эффективными, они могут обеспечить лишь частичное ослабление волны, и тем меньшее, чем заметнее параметры установок отличаются от приведенных величин, полученных на основании базового закона природы – закона сохранения энергии.