

УДК 532.517.4+536.463

## ВЛИЯНИЕ УСЛОВИЙ НА СТЕНКЕ ТУННЕЛЯ НА ВЗРЫВ СМЕСИ МЕТАНА С ВОЗДУХОМ

Ц. Цз. Ма, Ц. Чжан, Л. Пан

Пекинский технологический институт, 100081 Пекин, Китай, qzhang@bit.edu.cn

Экспериментально и теоретически исследовано влияние условий на поверхности стенок туннеля на взрыв смеси метан — воздух. Наличие препятствий на стенках канала приводило к увеличению турбулентности при взрыве метановоздушной смеси. В туннеле с гладкими стенками, в котором часть пространства была заполнена смесью метан — воздух, интенсивность турбулентности менялась с расстоянием вдоль оси: была выше в зоне предварительного смешивания метана с воздухом и в дальней зоне распространения ударной волны в воздухе, а между ними наблюдалось ослабление интенсивности. В зоне смешивания метана с воздухом турбулентность приводила к значительному увеличению давления в детонационной волне. В дальней зоне распространения ударной волны в воздухе турбулентность ослабляла ударную волну, но здесь влияние турбулентности трудно отделить от действия других факторов. В туннеле с шероховатыми стенками в зоне первоначального смешивания метана с воздухом давление взрыва смеси было выше, а за пределами этой зоны ударная волна в воздухе была слабее, чем в туннеле с гладкими стенками.

Ключевые слова: турбулентность, газовая детонация, смесь метан — воздух, поверхность стенок туннеля.

### ВВЕДЕНИЕ

Взрывы являются основной причиной несчастных случаев, сопровождающихся жертвами в подземных угольных шахтах [1]. Взрыв метана изучался на протяжении многих лет. При взрыве метана [2] продукты расширяются и сжимают вещество перед фронтом пламени, создавая волну сжатия, распространяющуюся с возрастающей скоростью. При этом волна, бегущая сзади, захватывает волну, бегущую впереди, что приводит к формированию детонационной волны с резким скачком давления, плотности и температуры. Благодаря дополнительно генерируемой или возрастающей турбулентности перед фронтом пламени интенсивность тепловыделения увеличивается, пламя ускоряется и ударная волна усиливается [3]. В зоне горения всё пламя распространяется очень быстро, и при этом наблюдаются его сильные микроскопические пульсации. Следовательно, в пристеночной зоне вязкий слой становится крайне тонким, шероховатость и неровности на поверхности стенки будут оказывать влияние на турбулентное ядро потока

и тем самым на распространение ударной волны.

В работе [4] разработаны математические модели для тестирования размера ячейки, скорости турбулентного горения и масштаба модели, с тем чтобы исследовать и улучшить точность кодов пакета для вычисления динамики жидкости CFD. В [5] впервые экспериментально показано, что шероховатость стенки сильно влияет на ускорение пламени. Сравнение результатов вычисления по модели с цилиндрическими препятствиями с использованием пакета AutoReaGas с экспериментальными данными подтвердило значение углового коэффициента скорости пламени и постоянной моделирования турбулентного горения. Существенное влияние шероховатости стенки на перемещение пламени при взрыве газа проанализировано в [6] на основе экспериментальных данных. Во многих других исследованиях [7–12], где изучалось действие препятствий на распространение пламени и детонационной волны во взрывчатой смеси метана с воздухом, также получены результаты, указывающие, что препятствия могут быстро ускорять пламя и усиливать ударную волну.

Все экспериментальные результаты свидетельствуют о сильном влиянии условий на стенках туннеля на детонацию. Тем не менее

физический механизм ускорения пламени не понятен, и нет ни одного исследования, проясняющего его. Принимая во внимание, что шероховатость стенки реальной шахты сильно шероховатая, необходимо построить более соответствующую реальной ситуации численную модель.

Цель настоящей работы — исследование влияния шероховатости поверхности стенки на взрыв метана в воздухе в туннеле. Использовался коммерческий код AutReaGas. Путем численного моделирования получено соотношение между шероховатостью поверхности и турбулентностью, а также максимальным избыточным давлением.

## 1. ЧИСЛЕННАЯ МОДЕЛЬ

Вычислительный пакет CFD решает дифференциальные уравнения в частных производных Навье — Стокса и Эйлера методом конечных объемов. В этом методе уравнения газовой динамики для массы, импульса и энергии используются в консервативной форме. Для проведения оптимальных вычислений применялись два типа процессоров: процессор Навье — Стокса для моделирования взрыва газа и процессор Эйлера для моделирования ударной волны. Использовано два вычислительных алгоритма для анализа взрыва облака газа и наблюдения за явлениями сжатия и ударными волнами.

Поле турбулентного течения описывается двухпараметрической ( $k-\varepsilon$ )-моделью, включающей в себя консервативные уравнения для кинетической энергии турбулентности  $k$  и скорости ее диссипации  $\varepsilon$ . Интенсивность турбулентности  $u'$  и характеристический масштаб длины  $L_t$  могут быть вычислены через  $k$  и  $\varepsilon$  следующим образом:

$$u' = \sqrt{\frac{2}{3}k}, \quad (1)$$

$$L_t = c_\mu^{0.75} \frac{k^{3/2}}{\varepsilon}, \quad (2)$$

где  $c_\mu$  — константа моделирования турбулентности, равная 0.09.

Реакция горения рассматривается как одностадийный процесс превращения реагентов в продукты. Объемная константа скорости горения  $R_c$  эмпирически выражается в виде

$$R_c = C_t \rho \frac{S_t^2}{\Gamma} R_{\min}. \quad (3)$$

Здесь  $\rho$  — плотность смеси,  $\Gamma$  — коэффициент турбулентной диффузии,  $R_{\min}$  — минимальная массовая доля одного из компонентов: горючего, кислорода и продуктов,  $C_t$  — безразмерная константа,  $S_t$  — турбулентная скорость горения, определяемая соотношением Брэя:

$$S_t = 1.8u'^{0.412} L_t^{0.196} S_l^{0.784} \nu^{-0.196},$$

где  $S_l$  — ламинарная скорость зажигания,  $\nu$  — кинематическая вязкость свежей смеси.

## 2. ТЕСТИРОВАНИЕ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНОЙ МОДЕЛИ

### 2.1. Физическая модель

Для подтверждения эффективности численного алгоритма (кода) выполнены расчеты, соответствующие экспериментальным условиям работы [13]. Расчеты проведены для прямого канала шахты квадратного сечения площадью  $7.2 \text{ м}^2$  ( $2.68 \times 2.68 \text{ м}$ ) и длиной 886 м. С одной стороны канал ограничен жесткой стенкой (опция «Solid»), другой конец открыт. Источник зажигания помещался у закрытого конца туннеля шахты. Препятствия с поперечным сечением  $0.05 \times 0.05 \text{ м}$  располагались периодически через каждые 2 м на внутренней стенке шахтного туннеля, как показано на рис. 1. В табл. 1 приведены данные об объеме и глубине заполнения туннеля смесью метан — воздух с концентрацией горючего 9.5 % для трех рассмотренных случаев.

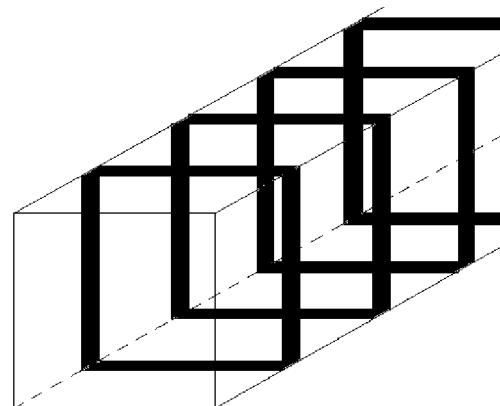


Рис. 1. Схема канала с препятствиями

Таблица 1  
Объемы метановоздушной смеси

Вариант	Объем смеси, м <sup>3</sup>	Длина туннеля, занимаемая смесью, м
1	50	6.94
2	100	13.89
3	200	27.78

## 2.2. Влияние размера сетки

Вариант 1 был модельным. Для того чтобы оценить точность при использовании расчетной сетки с очень большим размером ячейки, расчеты проводились для двух сеток с разным размером ячеек. Грубая сетка ( $G_1$ ) содержала 21 152 кубических ячейки ( $4 \times 4 \times 1\,322$ ), сетка с высоким разрешением ( $G_2$ ) — 169 216 кубических ячеек ( $8 \times 8 \times 2\,644$ ). Соответствующие результаты показаны на рис. 2 и в табл. 2, 3. Оказалось, что результаты расчетов хорошо согласуются друг с другом. Относительная разность избыточного давления не превышала 10 %, а различие температур было меньше 5 %, за исключением одной точки. Таким образом, обе сетки подходили для моделирования. С целью экономии времени и вычислительных ресурсов для моделирования в дальнейшем использовалась грубая сетка ( $G_1$ ).

## 2.3. Верификация модели

Для проверки корректности физической

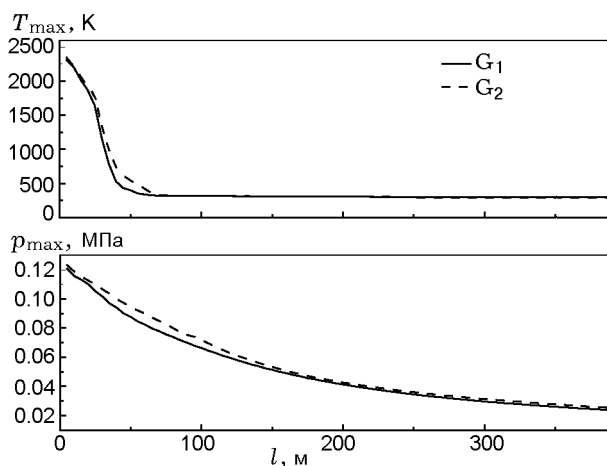


Рис. 2. Зависимость максимальной температуры и избыточного давления от расстояния вдоль оси

Таблица 2  
Максимальное избыточное давление для двух видов сеток

Расстояние вдоль оси, м	$p_{\max}(G_1)$ , МПа	$p_{\max}(G_2)$ , МПа	Относительная разность, %
5	0.121	0.123	1.6
10	0.116	0.119	2.5
20	0.110	0.113	2.7
50	0.088	0.097	9.3
100	0.066	0.071	7.0
200	0.041	0.043	4.7
300	0.030	0.031	3.2
400	0.023	0.024	4.2

Таблица 3  
Максимальная температура для двух видов сеток

Расстояние вдоль оси, м	$T_{\max}(G_1)$ , К	$T_{\max}(G_2)$ , К	Относительная разность, %
5	2 313	2 345	1.4
10	2 208	2 216	0.4
20	1 868	1 922	2.8
50	402	538	25.3
100	318	320	0.6
200	308	309	0.3
300	303	289	4.8
400	300	288	4.2

модели выполнено сравнение расчетов для варианта 1 на грубой сетке ( $G_1$ ) с экспериментальными результатами работы [13]. На рис. 3 показаны экспериментальные и расчетные зависимости максимального давления от расстояния вдоль оси туннеля. Видно, что численная модель адекватно воспроизводит результаты экспериментов.

## 3. ВЛИЯНИЕ ПРОМЕЖУТКОВ МЕЖДУ ПРЕПЯТСТВИЯМИ

### 3.1. Условия моделирования

Различные расстояния между препятствиями, прилегающими к стенкам шахтного туннеля, отражают различные граничные условия и разную степень шероховатости. Рассмотрены

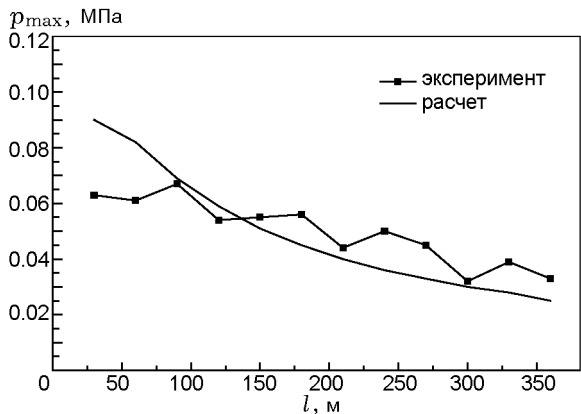


Рис. 3. Сравнение результатов расчета с экспериментальными данными

случаи с расстоянием между препятствиями 1, 2 и 3 м, которые обозначены как  $M_1$ ,  $M_2$  и  $M_3$  соответственно. Поперечное сечение препятствий  $0.05 \times 0.05$  м. Для моделирования выбран вариант 3 (см. табл. 1) с сеткой типа  $G_1$ . Размер ячейки моделирования  $0.67 \times 0.67 \times 0.67$  м.

### 3.2. Результаты и их анализ

На рис. 4 показана зависимость максимального давления от расстояния вдоль оси туннеля. Видно, что максимальное давление быстро растет в зоне перемешивания метана с воздухом и за границей этой области сначала уменьшается резко, а затем плавно. Более того, внутри заполненной метановоздушной смесью области пик избыточного давления для случая  $M_1$  выше, чем для  $M_2$  и  $M_3$  ( $M_1 > M_2 >$

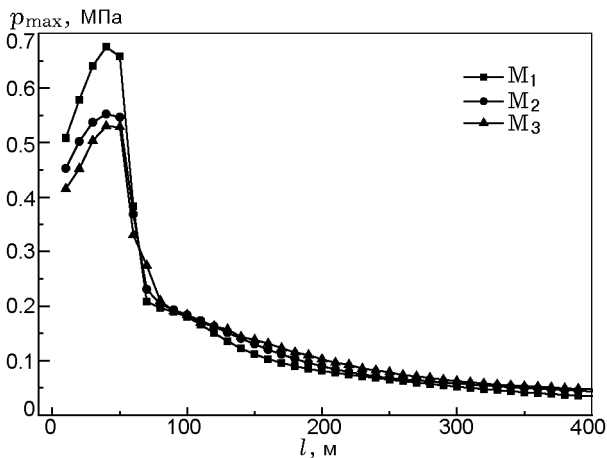


Рис. 4. Зависимость максимального избыточного давления от расстояния

$M_3$ ). В то же время за пределами зоны предварительного перемешивания он ниже, чем в  $M_2$  и  $M_3$  ( $M_1 < M_2 < M_3$ ). Причина в том, что препятствие внутри области перемешивания смеси может вызвать турбулентность, генерируемую перед фронтом волны, и, следовательно, увеличить избыточное давление, при том что нет дополнительных источников энергии вне этой области. Препятствие играет роль силы сопротивления, которая уменьшает энергию ударной волны. Чем больше установлено препятствий, тем выше избыточное давление в области предварительного перемешивания и ниже за ее пределами.

Изменение турбулентной кинетической энергии и скорости ее диссипации иллюстрируют рис. 5 и 6 соответственно. На рис. 7 показана интенсивность турбулентности, вычисленная по уравнению (1). Можно выделить две области с экстремально большой интенсивностью турбулентности: в зоне предварительного перемешивания метана с воздухом и в области затухания ударной волны. В первой из них турбулентность усиливается вследствие ускоряющейся ударной волны и затем затухает при исчезновении волны горения, так как скорость диссипации турбулентной кинетической энергии очень велика (см. рис. 6). Затем следует область ламинарного течения, в которой ударная волна затухает медленно. На достаточно больших расстояниях вдоль оси энергия турбулентного течения снова увеличивается, при этом скорость диссипации турбулентной кинетической энергии очень мала. Таким образом, турбулентная кинетическая энергия

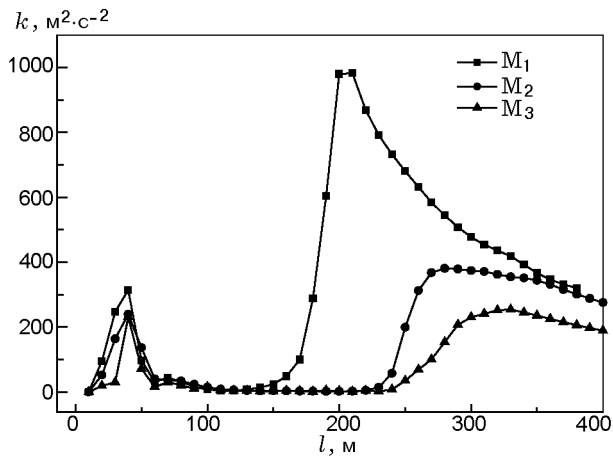


Рис. 5. Зависимость турбулентной кинетической энергии от расстояния

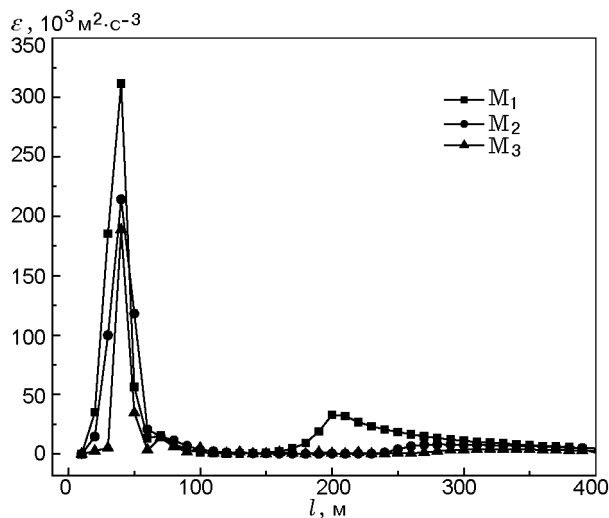


Рис. 6. Зависимость скорости диссипации турбулентной кинетической энергии от расстояния

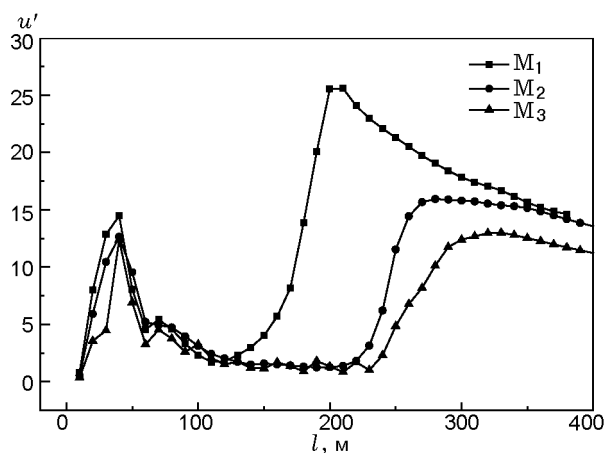


Рис. 7. Интенсивность турбулентности

тическая энергия может длительное время оставаться на относительно высоком уровне. В зоне предварительного перемешивания чем больше интенсивность турбулентности, тем больше сила взрыва и быстрее ускоряется пламя. В области затухания ударной волны чем интенсивнее турбулентность, тем быстрее затухает ударная волна. На интенсивность турбулентности влияет профиль поверхности туннеля. Неровности на поверхности его стенок приводят к усилению ударной волны и ускоряют ее затухание. И наоборот, в случае достаточно ровной поверхности амплитуда ударной волны меньше, следовательно, зона повреждений больше.

В дополнение, турбулентность очень ин-

тенсивна в области предварительного перемешивания, при этом она сильно отличается при разных условиях на стенках, так же как сильно отличается и давление в ударной волне. Чем меньше шаг между препятствиями, тем больше избыточное давление и кинетическая энергия турбулентного потока, что указывает на существенное влияние турбулентности. В то же время в области затухания ударной волны амплитуда волны меняется медленно, даже если интенсивность турбулентности различается сильно, т. е. влияние турбулентности слабое.

Распространение пламени ускоряется вследствие развития неустойчивостей, которые приводят к развитию возмущений во фронте пламени. В результате возрастает площадь фронта и, следовательно, скорость горения. Турбулентность увеличивает не только скорость транспорта тепла и вещества, но и эффективную площадь пламени, т. е. границы между горючей смесью и продуктами горения. Вначале, когда турбулентность достаточно слабая, вихри только возмущают поверхность пламени и повышают его эффективную скорость горения. Следствием является увеличение скорости течения. Более высокие скорости потока сопровождаются более сильной турбулентностью. Под ее действием фронт пламени постепенно теряет свою первоначально гладкую форму. Турбулентные вихри стремятся раздробить фронт, что приводит к более высокой скорости горения и, как результат, к более сильному расширению и дальнейшему развитию турбулентности. Процесс происходит с положительной обратной связью. В конце концов граничные условия, способствующие развитию турбулентности (условия на поверхности стенки в этой работе), включают положительную обратную связь в процессе распространения взрыва. В итоге давление нарастает примерно экспоненциально.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе использован численный метод из пакета CFD. Его точность проверена для случая моделирования взрыва газа в туннеле шахты. Расчеты каналов с периодическими препятствиями выполнены для трех различных расстояний между препятствиями, чтобы продемонстрировать влияние различных условий на стенке туннеля. Показано, что условия на стенке шахты играют значительную роль при

взрыве смеси метан — воздух. Влияние турбулентности в зоне предварительного перемешивания отличается от условий за ее пределами. Давление в этой области в туннеле с шероховатыми стенками выше, чем в туннеле с гладкими стенками. В области затухания ударной волны, наоборот, давление выше в случае гладких стенок. Более того, турбулентность развивается сильнее и больше влияет на распространение волны взрыва в области смешивания метана с воздухом, и ее влияние существенно ослабевает в области затухания взрывной волны, хотя турбулентность здесь выше, чем в области предварительного перемешивания.

Авторы выражают благодарность за финансовую поддержку Национальному фонду естественных наук Китая (проект № 11372044) и Фонду докторских диссертаций Китая (20111101110008).

#### ЛИТЕРАТУРА

1. **Msiza D. M.** The review of the flammable gas and coal dust explosions // *J. Min. Venti. Soc. S. Afr.* — 2003. — V. 56, N 3. — P. 119–122.
2. **Bjerketvedt D., Bakke J. R., Wingerden K. V.** Gas explosion handbook // *J. Hazard. Mater.* — 1997. — V. 52, N 1. — P. 1150.
3. **Moen I. O., Lee J. H. S., Hjertager B. H., et al.** Influence of obstacles on flame propagation and pressure development in a large vented tube // *Combust. Flame.* — 1981. — V. 47. — P. 3–52.
4. **Popat N. R., Catlin C. A., Arntzenb B. J.** Investigations to improve and assess the accuracy of computational fluid dynamic based explosion models // *J. Hazard. Mater.* — 1996. — V. 45, N 1. — P. 1–25.
5. **Janovsky B., Selesovsky P., Horkel J., et al.** Vented confined explosions in Stramberk experimental mine and AutoReaGas simulation // *J. Loss Prev. Process Ind.* — 2006. — V. 19, N 2-3. — P. 280–287.
6. **Zhai C., Lin B. Q., Guan C. G., et al.** Influence of wall roughness on flame transmission of gas explosion // *J. China Univ. Min. Tech.* — 2006. — V. 35. — P. 39–43.
7. **Ding Y. B., Guo Z. R.** Research status of flame propagation of combustible gas under conditions of obstacles // *Ind. Saf. Envi. Prot.* — 2006. — V. 32. — P. 30–31.
8. **Pang L., Zhang Q., Wang T.** Influence of laneway support spacing on methane/air explosion shock wave // *Saf. Sci.* — 2012. — V. 50, N 1. — P. 83–89.
9. **Evans M. W.** A study of high velocity flames developed by grids in tubes // *Symp. Combust. Flame Explos. Phenom.* — 1949. — V. 3, N 1. — P. 168–176.
10. **Moen I. O., Donato M.** Flame acceleration due to turbulence produced by obstacles // *Combust. Flame.* — 1980. — V. 39, N 1. — P. 21–32.
11. **Щелкин К. И.** Газодинамика горения // *Физика горения и взрыва.* — 1968. — Т. 4, № 4. — С. 455–468.
12. **Williams G. C., Hottel H. C., Scurlock A. C.** Flame stabilization and propagation in high velocity gas streams // *Symp. Combust. Flame Explos. Phenom.* — 1949. — V. 3, N 1. — P. 21–40.
13. **Xu J. D., Xu S. L., Yang G. Y.** Experimental study on mine gas explosion diffusion // *Coal Sci. Technol.* — 2004. — V. 32. — P. 55–57.

*Поступила в редакцию 26/XII 2012 г.*