

УДК 534.222.2+536.46

## ИССЛЕДОВАНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК УДАРНОЙ ВОЛНЫ, ОБРАЗОВАВШЕЙСЯ В РЕЗУЛЬТАТЕ ВЗРЫВА МЕТАНОВОЗДУШНОЙ СМЕСИ, ПРИ ЕЕ РАСПРОСТРАНЕНИИ В РАЗВЕТВЛЕННОМ КАНАЛЕ

Z.-L. Wu<sup>1,3</sup>, J.-L. Gao<sup>2</sup> Y.-T. Li<sup>1,3</sup>

<sup>1</sup>College of Safety and Ocean Engineering, China University of Petroleum, Beijing 102249, China, liyt@cup.edu.cn

<sup>2</sup>School of Safety Science and Engineering, Henan Polytechnic University, Jiaozuo, Henan 454003, China

<sup>3</sup>Key Laboratory of Oil and Gas Safety and Emergency Technology, Ministry of Emergency Management, Beijing 102249, China

Методом крупных вихрей исследован процесс распространения ударной волны в канале с разветвлениями, с акцентом на изменение избыточного давления при различных интенсивностях взрыва и количестве разветвлений. Для выявления влияния структуры канала в четырех моделях использованы варианты с длиной аккумуляции газа 5, 10, 15 и 20 м. Результаты показывают, что при наличии разветвлений канала коэффициент усиления ударной волны в основном канале нелинейно зависит от длины аккумуляции газа. Увеличение количества разветвлений при постоянной длине аккумуляции газа может существенно сократить скорость роста избыточного давления на определенном расстоянии от центра взрыва. Избыточное давление в ответвлениях канала вдали от центра взрыва изменяется в меньшей степени. Из-за влияния структуры соседних ветвей флуктуации более хаотичные, чем в основном канале.

Ключевые слова: структура ветвей, взрыв газа, избыточное давление, численное моделирование, безопасность.

DOI 10.15372/FGV2023.9407

EDN DKETBJ

### ВВЕДЕНИЕ

Согласно статистическим данным, в Китае в 2022 г. полученная из угля энергия составила 56.2 % от общего количества [1]. Угольные шахты в зависимости от планировки и эволюции системы подземной вентиляции [2, 3], динамического разделения зон добычи и транспортировки [4] имеют сложную сетевую структуру, что приводит к увеличению числа аварий, связанных со скоплением газа, случайными пожарами и взрывами [5]. Около 85 % всех пожаров и взрывов происходит в забоях, выработках и зонах транспортировки [6]. Проблема осложняется тем, что невозможно точно предсказать место взрыва и его параметры [7–9]. Поэтому распространение взрывных волн по различным подземным транспортным сооружениям представляет собой один из актуальных вопросов современных исследований. Проводятся эксперименты по изучению взрывов газа в небольших трубах и в полномасштабных моделях, теоретический анализ мощности взрыва, численное моделирование с использованием методов вычислительной гидродинамики и другие исследования [10–12].

Ранее из-за опасности интенсивных взрывов на протяженных и ограниченных испытательных площадках многие ученые предпочитали проводить эксперименты в трубах [13–15]. Например, в [16] использовали шесть взрывных сосудов разного объема и

формы, а также серию гибких труб. В работе [5] рассматривалось распространение ударных волн в туннелях различной длины при разных углах раскрытия. Обнаружено, что бифуркация трубы приводила к шунтированию части пламени и волны давления и вследствие этого к ослаблению интенсивности во вторичном канале. Влияние структуры канала на распространение взрывной волны при различных условиях взрыва требует дальнейшего исследования. Из-за трудностей масштабирования эксперимента и некоторых экспериментальных площадок всё большую актуальность приобретают расчетные методы. Вычислительная гидродинамика (CFD) позволяет с хорошей точностью моделировать процесс взрыва при достаточно низких затратах. Разработаны теоретические и экспериментальные модели взрыва различной сложности. В [17–21] использовались инструменты CFD для численных и аналитических исследований последствий крупномасштабных взрывов, была выполнена валидация результатов. Множество исследований посвящено распространению волны давления от взрыва газа в различных условиях. Например, в [22] изучали пламя и волны давления, образовавшиеся в результате взрывов смеси газов различной концентрации. В [23] проанализировано затухание избыточного давления ударной волны в зависимости от расстояния до точки взрыва. Получена нелинейная зависимость между расстоянием до центра взрыва и временем. В [24] выполнены исследования на лабораторной установке на базе небольшой трубы с тройной бифуркацией.

Несмотря на многочисленность исследований закона распространения ударной волны от взрыва газа в туннелях сложной структуры, влияние разветвленной структуры требует дальнейшего изучения. Кроме того, в экспериментах на установках небольших размеров чаще всего изучают отдельные аспекты данной проблемы и лишь частично затрагивают общие закономерности распространения ударных волн внутри крупномасштабных туннелей сложной структуры. Цель нашей работы — проверить точность выбранной модели, используя результаты исследования на небольшой экспериментальной, ранее построенной модели простой структуры. На основе данных о больших подземных туннелях проанализированы законы распространения аккумуляций газа в различных разветвленных структурах путем построения трехмерной модели. Изучено влияние сложной структуры туннелей на избыточное давление взрыва газа. Это играет важную роль при выработке целевых рекомендаций по снижению катастрофической интенсивности взрывов газа.

## 1. МЕТОДОЛОГИЯ

### 1.1. Теоретические основы

Платформа моделирования ANSYS Workbench включает в себя различные программные модули, такие как Mesh, Fluent и другие, что позволяет анализировать и моделировать задачи динамики жидкостей, статические и динамические задачи механики твердых деформируемых сред и сложные сопряженные системы. Fluent, решатель CFD, может моделировать широкий класс течений жидкости и является популярным коммерческим программным модулем для расчета поля течения. Благодаря разнообразию методов решения и применяемых методов сходимости, Fluent позволяет достичь оптимальной скорости сходимости и точности решения. ANSYS Workbench 2021R1 использован для моделирования распространения взрыва газа. Расчетный алгоритм основан на методе конечных объемов, для связи полей давления и скорости используется метод SIMPLE.

С учетом характеристик и предположений о распространении ударной волны в системе туннелей запишем уравнения законов сохранения массы, импульса, энергии и уравнения переноса компонентов в следующем виде [10]:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_i} (\rho u_i) = S_m, \quad (1)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho u_i) + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho u_i u_j) = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial \tau_{ij}}{\partial x_i} + \rho g_i + F_i, \quad (2)$$

$$\frac{\partial(\rho T)}{\partial t} + \text{div}(\rho u T) = \text{div}\left(\frac{\lambda}{c_p} \text{grad } T\right) + S_T, \quad (3)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \phi) + \text{div}(\rho u \phi) = \text{div}(K \text{grad } \phi) + S_\phi. \quad (4)$$

Здесь  $\rho$  — плотность;  $t$  — время;  $x_i$  — пространственная переменная в  $i$ -м направлении;  $u_i$  — скорость в  $i$ -м направлении;  $S_m$  — источниковый член, описывающий добавленную массу, который определяется пользователем, в данных расчетах  $S_m = 0$ ;  $p$  — статическое давление;  $\tau_{ij}$  — тензор напряжений, задаваемый выражением [10]

$$\tau_{ij} = \left[ \mu \left( \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \right] - \frac{2}{3} \mu \frac{\partial u_l}{\partial x_l} \delta_{ij}; \quad (5)$$

$g_i$  и  $F_i$  — соответственно гравитация и внешняя объемная сила в  $i$ -м направлении;  $c_p$  — удельная теплоемкость при постоянном давлении;  $T$  — температура;  $\lambda$  — теплопроводность жидкости;  $S_T$  — член вязкой диссипации, включающий в себя внутренний источник тепла в жидкости, а также часть механической энергии жидкости, переходящую в тепло под действием вязкости;  $\phi$  — общее обозначение компонентов;  $K$  — суммарный коэффициент диффузии;  $S_\phi$  — суммарный источниковый член.

Метод крупных вихрей (LES), предназначенный для моделирования турбулентности, использовался многими исследователями в различных областях, и его эффективность подтверждена [25–29]. Метод LES разделяет крупномасштабные и мелкомасштабные вихри с помощью некоторой фильтрующей функции [30, 31]. Крупномасштабные вихри рассчитываются непосредственно, в то время как мелкомасштабные вихри моделируются с помощью замыкающей модели Смагоринского [32]. Предложенный метод применялся и во многих более поздних исследованиях [33]. Суть метода изложена ниже.

Для компонентов используется уравнение

$$\bar{\phi} = \int_D \phi G(x, x') dx', \quad (6)$$

$$G(x, x') = \begin{cases} 1/V, x' \in v, \\ 0, x' \notin v. \end{cases} \quad (7)$$

Здесь  $D$  — область течения;  $x'$  — пространственная координата в фактической области течения;  $x$  — пространственная координата в крупномасштабном пространстве после фильтрации;  $G(x, x')$  — фильтрационная функция;  $V$  — размер контрольного объема.

Для несжимаемой ньютоновской жидкости уравнения Навье — Стокса имеют вид

$$\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_i} = 0, \quad (8)$$

$$\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j}(\bar{u}_i \bar{u}_j) = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial \bar{p}}{\partial x_i} - \frac{\partial \tau_{ij}}{\partial x_j} + \nu \frac{\partial^2 \bar{u}_i}{\partial x_j \partial x_j}. \quad (9)$$

Здесь  $\tau_{ij} = \rho \bar{u}_i \bar{u}_j - \rho \bar{u}_i \bar{u}_j$  — член подсеточных напряжений (SGS), описывающий влияние малых масштабов. В методе LES важен выбор подсеточной модели:

$$\tau_{ij} - \frac{\delta_{ij}}{3} \tau_{kk} = -2\nu_T \bar{S}_{ij}, \quad (10)$$

где

$$v_T = C\Delta^2|\bar{S}|\bar{S}_{ij}, \quad |\bar{S}| = (2\bar{S}_{ij}\bar{S}_{ij})^{1/2}, \quad (11)$$

$\Delta = (\Delta_x\Delta_y\Delta_z)^{1/3}$  — размер фильтра;  $C$  — константа Смагоринского, вычисляемая через константу Колмогорова  $C_k$ :  $C = 1/\pi(3C_k/2)^{3/4}$ .

Метод LES выбран вследствие меньшей затратности, чем метод прямого численного моделирования турбулентности (DNS). Поскольку метод точно разрешает все турбулентные масштабы, большие определенного, он позволяет уловить многие нестационарные и неравновесные крупномасштабные эффекты и квазиупорядоченные структуры, которые не могут быть получены при использовании осредненных по Рейнольдсу уравнений Навье — Стокса (RANS).

## 1.2. Физическая модель

Поскольку вычислительные затраты непосредственно зависят от сложности физической модели, для изучения распространения взрыва газа в зависимости от структуры туннелей была использована типовая конструкция [34, 35]. Анализировалось распространение взрыва предварительно перемешанной смеси газов при различных длинах аккумуляции газа в четырех трехмерных моделях длиной 137.8 м с прямоугольным сечением  $3.2 \times 2.4$  м, соответствующих угольной шахте в северо-западной части Китая, схемы которых показаны на рис. 1 и 2. Приведена часть туннеля, представляющая собой вспомогательную



Рис. 1. Схема локальной вентиляционной системы в угольной шахте

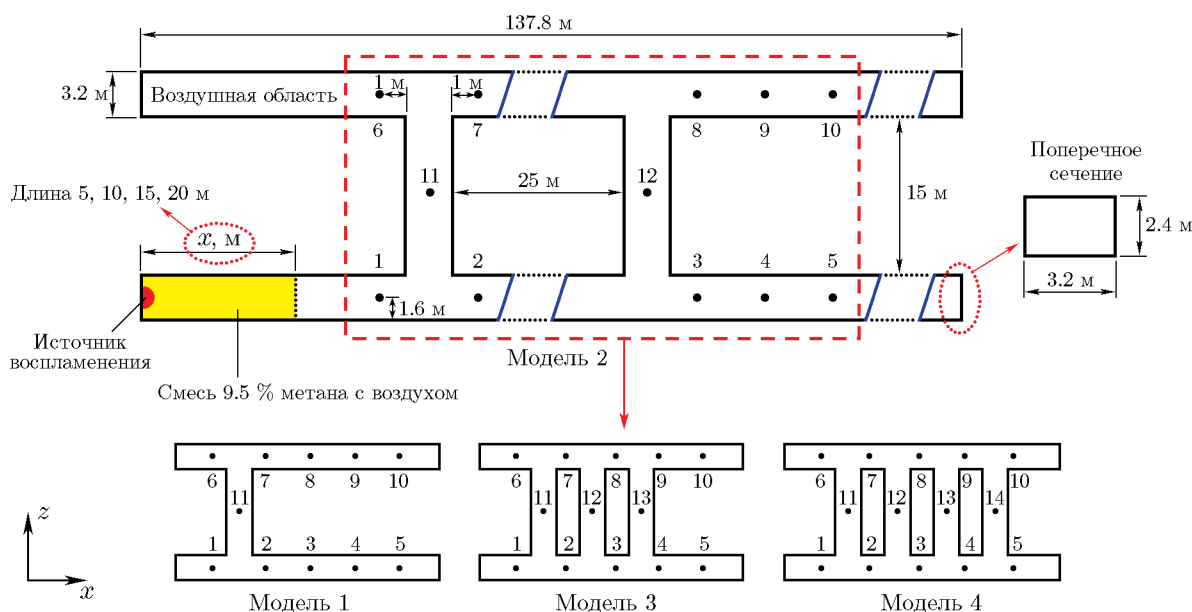


Рис. 2. Геометрическая модель

Таблица 1

| Положения точек контроля в туннеле |                                          |              |
|------------------------------------|------------------------------------------|--------------|
| Номер точки                        | Расстояние от источника воспламенения, м |              |
|                                    | горизонтальное                           | вертикальное |
| 1                                  | 24                                       | 0            |
| 2                                  | 113.8                                    | 0            |
| 3                                  | 29.2                                     | 0            |
| 4                                  | 57.4                                     | 0            |
| 5                                  | 85.6                                     | 0            |
| 6                                  | 24                                       | 18.2         |
| 7                                  | 29.2                                     | 18.2         |
| 8                                  | 57.4                                     | 18.2         |
| 9                                  | 85.6                                     | 18.2         |
| 10                                 | 113.8                                    | 18.2         |
| 11                                 | 26.6                                     | 9.1          |
| 12                                 | 54.8                                     | 9.1          |
| 13                                 | 83                                       | 9.1          |
| 14                                 | 111.2                                    | 9.1          |

транспортную артерию угольной шахты, обычно заполненную свежим воздухом. Но в случае выхода из строя вентилятора или других проблем здесь с большой вероятностью будет накапливаться горючий газ. Использовалась упрощенная модель, в которой каждая ветвь имела длину 15 м, расстояние между ветвями составляло 25 м. Каждая модель была разделена на три части: источник воспламенения, область предварительно перемешанного газа и воздушная область. Левые границы прилегающего и основного туннелей являются стенкой, правые — открытой выходной границей.

Точки контроля расположены по оси канала на различных расстояниях от точки воспламенения, детальная информация об этих точках представлена в табл. 1.

### 1.3. Сетка и начальные условия

При моделировании взрыва газа подготовка расчетной сетки является важным этапом и была выполнена в приложении Fluent Meshing. Применение грубой сетки приводит к неудовлетворительным результатам в задачах о распространении взрывных волн. Поэтому в данной работе использована детальная сетка, что увеличило объем вычислений. Сетка размером  $0.1 \times 0.1 \times 0.1$  м позволяет разрешить по крайней мере 80 % турбулентного спектра.

Начальное давление во всей области равно атмосферному  $1.01 \cdot 10^5$  Па. Начальная температура в области воспламенения равна 2000 К, во всех остальных областях — 300 К. Для изменения мощности взрыва варьировалась длина области аккумуляции горючей смеси: 10, 15 и 20 м. Моделировался взрыв газа с начальной концентрацией метана 9.5 %

Таблица 2

Начальные условия в каждой области

| Область                         | $T_0$ , К | $(\text{CH}_4)_0$ | $(\text{O}_2)_0$ | $(\text{N}_2)_0$ | $(\text{CO}_2)_0$ | $(\text{H}_2\text{O})_0$ | $x$ , м       |
|---------------------------------|-----------|-------------------|------------------|------------------|-------------------|--------------------------|---------------|
| Источник воспламенения          | 2 000     | 0                 | 0                | 1                | 0.145             | 0.11925                  | —             |
| Предварительно перемешанный газ | 300       | 0.055             | 0.212            | 0.733            | 0                 | 0                        | 5, 10, 15, 20 |
| Воздух                          | 300       | 0                 | 0.233            | 0.767            | 0                 | 0                        | —             |

(по объему). Начальные условия в каждой области приведены в табл. 2. Кинетика реакций метановоздушной смеси является сложной и включает в себя полные и приведенные механизмы. Чтобы сократить объем вычислений и обеспечить достоверность данных моделирования, в этой работе используется следующая необратимая брутто-реакция:



#### 1.4. Валидация математической модели

Проверка модели выполнена путем сравнения результатов расчетов с экспериментальными данными для модели, схема которой представлена на рис. 3 [36].

Были построены трехмерные модели прямого туннеля, включающие в себя область предварительно перемешанного газа длиной  $x = 8, 10$  и  $11$  м. Воздушная среда в остальной части туннеля находилась при нормальных атмосферных условиях. Полная длина геометрической модели составляла 16, 18 и 19 м соответственно. Размер поперечного сечения модели равен  $0.2 \times 0.2$  м. В геометрической модели построена сетка размером  $0.005 \times 0.005 \times 0.005$  м. Левый конец трубы, около которого расположен источник воспламенения, является стенкой, на правой открытой границе задано статическое давление. Положение контрольных точек, в которых сравнивались коэффициенты затухания, соответствовало эксперименту. Они были расположены на расстоянии 1 м до изгиба и 1 м после изгиба. Полученные в расчете и эксперименте коэффициенты затухания  $k_b$  приведены в табл. 3.

Экспериментальные значения коэффициента затухания находились в пределах  $1.314 \div 1.389$  для канала с изгибом  $90^\circ$ , а расчетные — в интервале  $1.107 \div 1.177$ . Погрешность между ними лежит в пределах разумного диапазона  $13 \div 15\%$ . Основной причиной расхождения может быть то, что в расчетах стенки канала предполагались гладкими, а в реальном эксперименте стенки были шероховатыми. Кроме того, распространение ударной волны представляет собой нестационарный процесс с переносом вихрей и другими явлениями, а параметры течения в заданных контрольных точках не могут представлять течение во всей области. Поэтому полученные данные могут различаться в пределах одной и той же области.

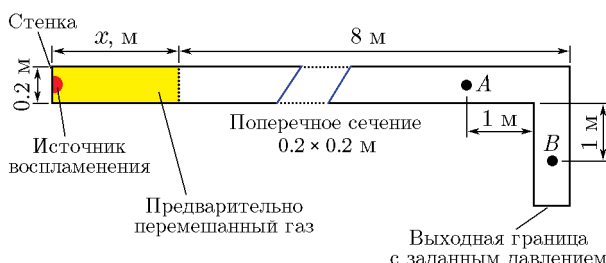
Рис. 3. Геометрическая модель трубы с изгибом под углом  $90^\circ$

Таблица 3

## Результаты расчетов и экспериментов

| Угол        | $x$ , м | $p_{max}$ , МПа |        | $k_b$ | Относительная<br>ошибка, % |
|-------------|---------|-----------------|--------|-------|----------------------------|
|             |         | $p_A$           | $p_B$  |       |                            |
| Эксперимент |         |                 |        |       |                            |
| 90°         | 8       | 0.5110          | 0.3889 | 1.314 | —                          |
|             | 10      | 0.7231          | 0.5320 | 1.359 | —                          |
|             | 11      | 0.7842          | 0.5645 | 1.389 | —                          |
| Расчет      |         |                 |        |       |                            |
| 90°         | 8       | 0.5530          | 0.4994 | 1.107 | 15                         |
|             | 10      | 0.5915          | 0.5024 | 1.177 | 13                         |
|             | 11      | 0.6744          | 0.5750 | 1.173 | 15                         |

Примечания.  $p_A$  — избыточное давление в точке  $A$ ,  $p_B$  — избыточное давление в точке  $B$  (см. рис. 3);  $k_b$  — коэффициент затухания.

## 2. РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЯ

### 2.1. Распространение ударной волны

Для анализа изменения избыточного давления взрывной волны в качестве примера выбрана модель 4 с длиной аккумуляции газа  $x = 15$  м. Результаты расчетов по ней показаны на рис. 4 и 5.

Скопление газа на левом конце туннеля взрывается под действием источника воспламенения. Взрывная волна распространяется и развивается по мере воспламенения газа внутри туннеля, и фронт пламени распространяется по длине траншеи. Вследствие суперпозиции обратной и фронтальной волн в ударной волне (УВ) создается огромная разница давлений. Это приводит к ситуации, показанной на диаграмме (см. рис. 4). Такое явление упоминалось в предыдущем исследовании [37, 38]. С увеличением скорости сгорания метана волны горения сжимают воздух перед зоной горения, и многочисленные волны сжатия взаимодействуют друг с другом, образуя УВ. Через 24 мс, когда УВ достигает контрольной точки, расположенной на расстоянии 1 м перед бифуркацией, избыточное давление в точке контроля 1 резко возрастает до 0.87 МПа. УВ продолжает распространяться в положительном направлении вдоль оси туннеля. Из-за расширения площади сечения в месте разветвления канала УВ по-разному отражается и преломляется от стенки. После прохождения поворота канала УВ продолжает распространяться вдоль канала, постепенно затухая.

После прохождения разветвления избыточное давление в УВ падает до 0.62 МПа в точке контроля 2. Вследствие сложной геометрической структуры туннеля возникает несколько локальных УВ, и в точках контроля 2–5 избыточное давление УВ имеет два пика за короткий промежуток времени. При этом УВ распространяется по ответвлениям и выходит в соседний параллельный туннель.

УВ, распространяющаяся по вторичному туннелю, достигает соответствующих контрольных точек позже, чем УВ, распространяющаяся по основному туннелю. Из-за влияния разветвленной геометрической структуры туннеля профиль давления во вторичном

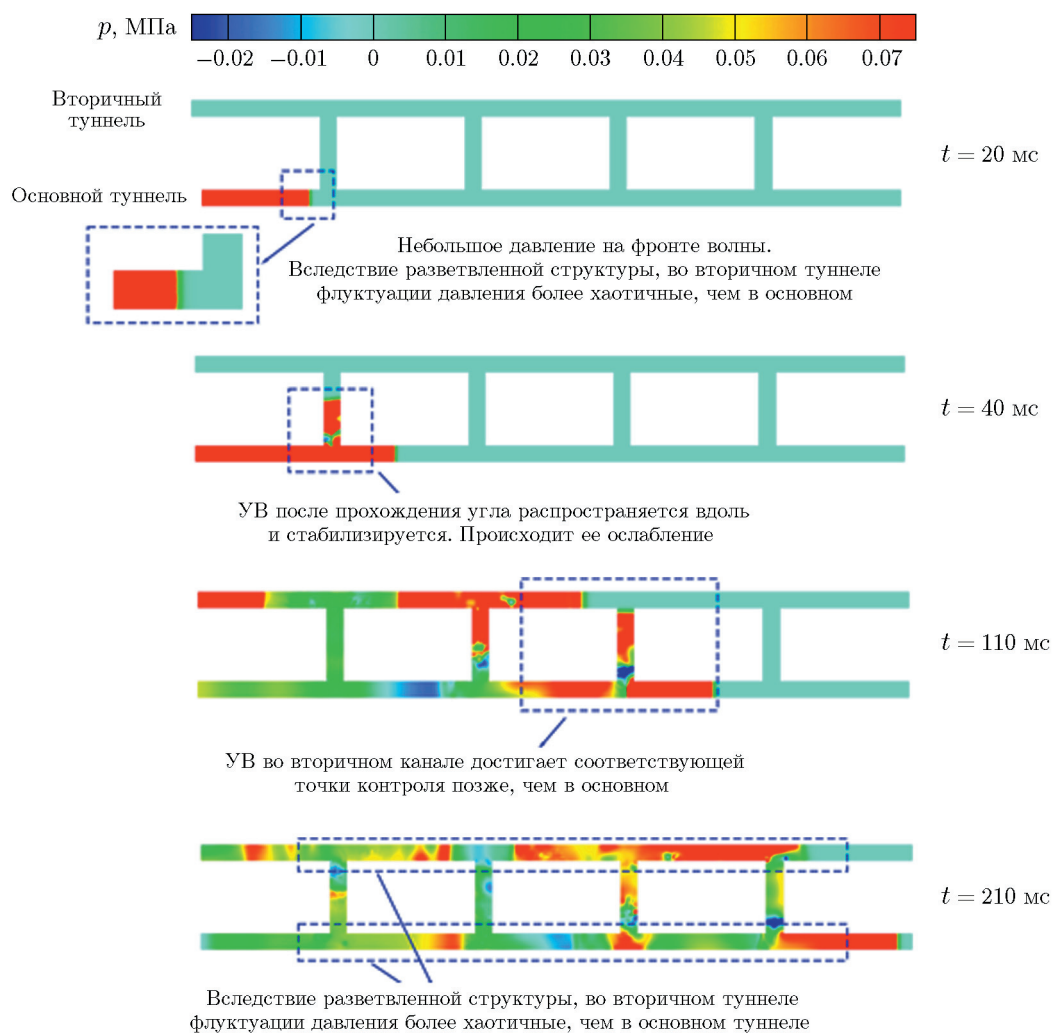


Рис. 4. Давление взрыва в различные моменты времени, рассчитанное для модели 4 с длиной аккумуляции газа 15 м

туннеле имеет больше хаотических колебаний, чем в основном туннеле. Кроме того, поскольку левая граница туннеля, как отмечено в § 1.2, является стенкой, вблизи нее появляется область высокого давления. Вследствие затухания интенсивность отраженной УВ меньше, чем первичной УВ, распространяющейся по туннелю. Общее влияние отраженной УВ на избыточное давление в туннеле невелико, и им можно пренебречь.

## 2.2. Затухание в разветвлениях канала

Для описания данных по степени затухания с использованием значений максимального избыточного давления были вычислены коэффициенты затухания в бифуркациях:

$$k_b = p_1/p_i. \quad (13)$$

Здесь  $p_1$  — избыточное давление в точке контроля 1,  $p_i$  — избыточное давление во всех остальных точках туннеля после взрыва. Результаты показаны на рис. 6.

На основе анализа данных о структуре туннеля и результатов моделирования можно заключить, что коэффициенты затухания избыточного давления в разных ветвях туннеля немного отличаются. Например, для случая, когда длина аккумуляции газа составляет



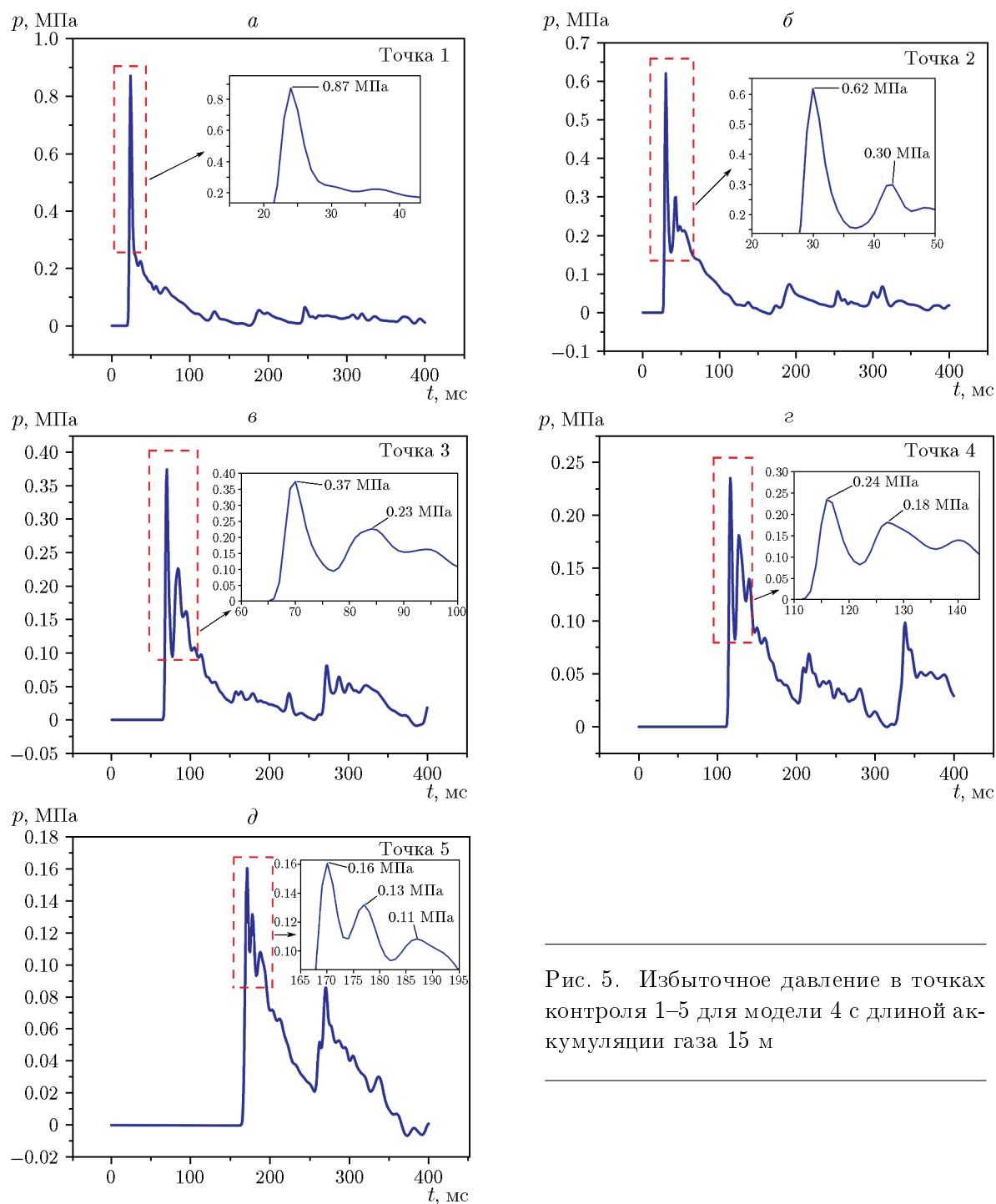


Рис. 5. Избыточное давление в точках контроля 1–5 для модели 4 с длиной аккумуляции газа 15 м

$x = 5$  м, из-за наличия первой ветви коэффициенты затухания в точке контроля 2 в моделях 1–4 равны 1.2903, 1.303, 1.2813 и 1.2903 соответственно. Значения коэффициентов близки. Поэтому ниже анализируется только затухание в соответствующих точках различающихся структур.

Коэффициенты затухания в точке контроля 2 равны 1.2903, 1.3478, 1.3770 и 1.3378 при длине аккумуляции газа соответственно  $x = 5, 10, 15$  и 20 м в модели 1. Коэффициенты со-

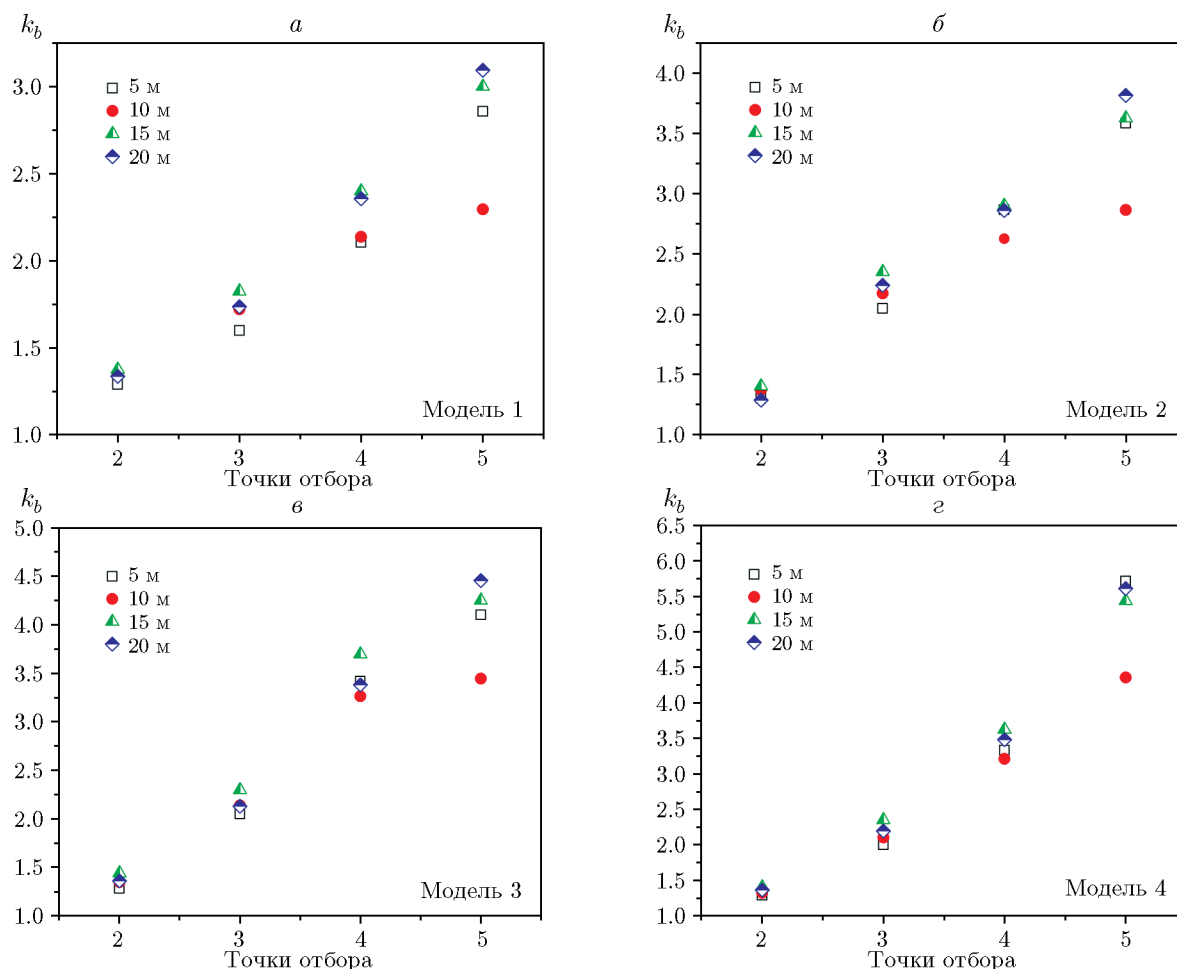


Рис. 6. Связь между коэффициентом затухания и интенсивностью взрыва в каждой точке контроля

относятся друг с другом следующим образом:  $k_{15\text{м}} > k_{10\text{м}} > k_{20\text{м}} > k_{5\text{м}}$ . Это показывает, что максимальное значение коэффициента затухания после прохождения ударной волной первого разветвления постепенно возрастает с увеличением интенсивности взрыва. Коэффициент затухания достигает максимума при длине аккумуляции газа  $x = 15$  м. На основе закона распространения УВ, анализа этого процесса, выполненного в § 2.1 для УВ в разветвленных туннелях, а также результатов исследований [39, 40] можно предположить, что причиной этого эффекта является то, что обусловленные различной начальной интенсивностью многочисленные отражения, центрирования и суперпозиции ударных волн происходят различным образом. Степени затухания УВ различаются.

Коэффициент затухания в точке контроля 3 равен  $k_b = 1.6, 1.7222, 1.8261, 1.7368$  в модели 1, в то время как в модели 2 он равен  $k_b = 2.0476, 2.1724, 2.3514$  и  $2.2391$ . Поведение коэффициента затухания в обоих случаях одинаково: сначала коэффициент увеличивается, а затем уменьшается. Отличием является то, что из-за существования второй ветви коэффициент затухания в модели 2 при различных интенсивностях взрыва газа в  $1.26 \div 1.29$  раза превышает соответствующий показатель в модели 1. Это свидетельствует о том, что ответвления могут эффективно ослаблять интенсивность УВ.

При наличии третьей ветви кривая изменения коэффициента затухания в соответствующих точках в моделях 2 и 3 подвержена флуктуациям. Минимальное значение достигается

ется при длине аккумуляции газа  $x = 10$  м. Анализ на основе закономерностей распространения УВ позволяет предложить следующие причины этого: во-первых, в процессе распространения степень отражения УВ от стенки различна при разной интенсивности УВ; во-вторых, вследствие различий между моделями 1–3 интенсивность УВ изменяется при прохождении первых двух ветвей, на которых УВ по-разному ослабляется, отражается и интерферирует.

Рис. 6 показывает, что тенденция изменения коэффициента затухания УВ в точке контроля 5 в моделях 1–4 отличается от поведения в точках 2–4: коэффициент с увеличением длины аккумуляции газа сначала уменьшается, а затем увеличивается. В этой точке эффекты дифракции, суперпозиции и усиления взрывной волны после ответвления наиболее интенсивны при длине аккумуляции газа  $x = 10$  м.

Хотя коэффициент затухания в точке контроля 5 показал ту же тенденцию изменения для модели 4, его величина изменилась следующим образом: от  $k_{20\text{м}} > k_{15\text{м}} > k_{5\text{м}} > k_{10\text{м}}$  к  $k_{5\text{м}} > k_{20\text{м}} > k_{15\text{м}} > k_{10\text{м}}$ . Это указывает на то, что наличие четвертой ветви является неединственной причиной такой тенденции изменения коэффициента затухания в точке контроля 5. Также необходимо учитывать влияние предыдущих ветвей на такие изменения волны, как суперпозиция и затухание.

### 2.3. Затухание при различном количестве ответвлений

Для того чтобы описать пульсирующее поведение УВ, в табл. 4 приведены данные о времени прихода  $t$  УВ в точку контроля, пиковом избыточном давлении  $p_{\text{max}}$  и скорости

Таблица 4

Избыточное давление, время прихода и скорость роста интенсивности ударной волны в точке контроля 5 в моделях 1–4

| $x$ , м | Модель | $p_{\text{max}}$ , МПа | $t$ , мс | $\Delta p$ , МПа $\cdot$ с $^{-1}$ |
|---------|--------|------------------------|----------|------------------------------------|
| 5       | 1      | 0.14                   | 203      | 0.690                              |
|         | 2      | 0.12                   | 207      | 0.580                              |
|         | 3      | 0.1                    | 211      | 0.474                              |
|         | 4      | 0.07                   | 212      | 0.330                              |
| 10      | 1      | 0.27                   | 177      | 1.525                              |
|         | 2      | 0.22                   | 182      | 1.209                              |
|         | 3      | 0.2                    | 185      | 1.081                              |
|         | 4      | 0.14                   | 185      | 0.757                              |
| 15      | 1      | 0.28                   | 161      | 1.739                              |
|         | 2      | 0.24                   | 167      | 1.437                              |
|         | 3      | 0.2                    | 170      | 1.176                              |
|         | 4      | 0.16                   | 170      | 0.941                              |
| 20      | 1      | 0.32                   | 150      | 2.133                              |
|         | 2      | 0.27                   | 155      | 1.742                              |
|         | 3      | 0.22                   | 158      | 1.392                              |
|         | 4      | 0.18                   | 157      | 1.146                              |

роста интенсивности волны  $\Delta p$  в точке контроля 5 в моделях 1–4 с различным количеством ветвей. Видно, что при длине аккумуляции газа  $x = 5$  м значения избыточного пикового давления УВ в моделях 1–4 равны 0.14, 0.12, 0.1 и 0.07 МПа соответственно. Разница значений между соседними моделями примерно равна 0.02 МПа, между моделями 1 и 4 — 0.07 МПа. При увеличении интенсивности взрыва газа разница значений между соседними моделями увеличивается с 0.02 до 0.05 МПа, а между моделями 1 и 4 не зависит от интенсивности взрыва и равна примерно 0.13 МПа. С учетом влияния начального давления взрыва (точка контроля 1) структура ветвей оказывает заметное влияние на УВ. Эффект затухания взрывной УВ при  $x = 5$  и 20 м сильнее, чем при  $x = 10$  и 15 м. Возможная причина этого явления заключается в том, что при  $x = 10$  и 15 м усиление и суперпозиция УВ проявляются более существенно в случае туннеля с разветвленной структурой.

При увеличении длины аккумуляции газа разница времени прихода УВ в точку контроля 5 в моделях 1–4 составляет  $1 \div 4$ ,  $0 \div 5$ ,  $0 \div 6$ ,  $0 \div 5$  с соответственно. Однако по мере увеличения количества ветвей разница во времени уменьшается. Возможно, причина этого заключается в том, что дополнительная ветвь способствует зарождению локальной УВ, что усиливает эффект суперпозиции и увеличивает скорость УВ. Например, разница во времени, требуемом для прохождения ударной волной всей модели, составляет 9, 8, 9 и 7 с для моделей 1–4 соответственно — различие незначительное. Это доказывает, что структура разветвлений может существенно увеличить время прихода УВ, но чем больше ветвей содержит структура, тем менее очевиден эффект.

Ослабляющий эффект структуры разветвлений на УВ меньше подвержен влиянию силы взрывной волны. Сравнение скорости нарастания избыточного давления (см. табл. 4) показывает, что с увеличением количества ветвей скорость роста избыточного давления в точке контроля 5 постепенно уменьшается. Например, при длине аккумуляции газа  $x = 5$  м скорость роста избыточного давления уменьшается от 0.69 до 0.33 МПа  $\cdot$  с $^{-1}$  при увеличении количества ветвей. При  $x = 5$ , 10, 15 и 20 м снижение скорости находится между значениями 0.36 и 0.987 МПа  $\cdot$  с $^{-1}$ .

## 2.4. Закон распространения ударной волны в ответвлениях

Данные в точке мониторинга 13, расположенной в третьей ветви, позволяют выполнить анализ колебаний избыточного давления УВ (рис. 7, 8).

На первом этапе ударная волна впервые достигает точки контроля 13. С увеличением длины аккумуляции газа время достижения ударной волной этой ветви сокращается — 118, 128, 142 и 162 мс соответственно. Избыточное давление монотонно снижается. Однако из-за существования первой и второй ветвей процесс распространения УВ является многостадийным. Поэтому на первом этапе в течение короткого периода времени наблюдаются два пика избыточного давления.

На втором этапе закон изменения избыточного давления отличается от наблюдавшегося на первом этапе. Возможной причиной изменений может быть то, что УВ, прошедшая через эту ветвь туннеля, взаимодействует с волной, распространяющейся по соседней, параллельной главной, ветке туннеля. После отражения и взаимодействия УВ снова приходит в ответвление, в результате чего избыточное давление в ответвлении снова возрастает. Кроме того, длина аккумуляции влияет на степень усиления УВ.

Совместно с приведенным выше анализом характеристик колебаний избыточного давления в разветвлениях туннеля выполнен статистический анализ первого пика избыточного давления в каждой ветви. Путем сравнения данных, полученных в соответствующих точках контроля, проанализированы закономерности распространения УВ внутри ветвей для модели 4. Данные о давлении за УВ приведены на рис. 9.

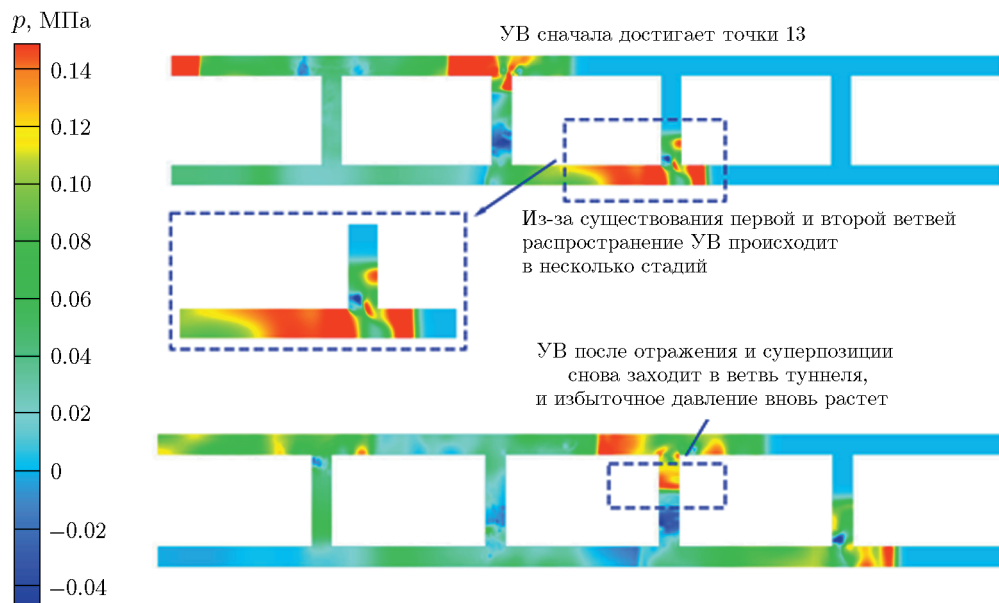


Рис. 7. Распространение взрывной волны по третьей ветви модели 4

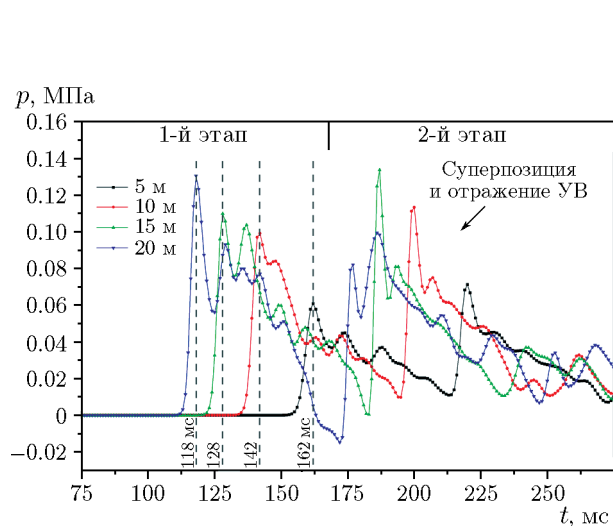


Рис. 8

Рис. 8. Флуктуации избыточного давления ударной волны в точке контроля 13 при различных длинах аккумуляции газа

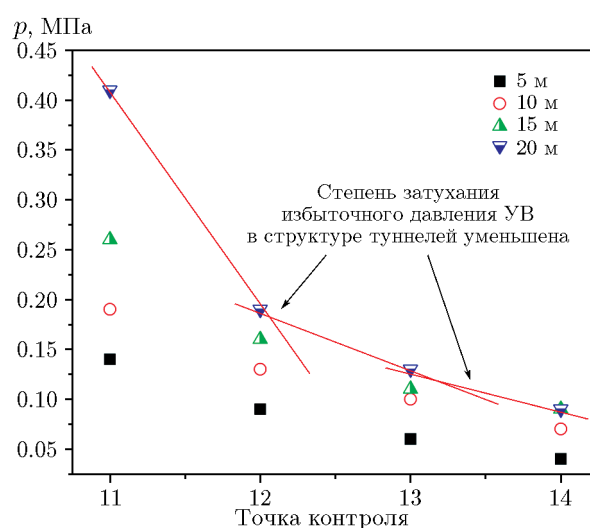


Рис. 9

Рис. 9. Распределения избыточного давления в разных точках контроля в каждой ветви модели 4

Значения избыточного давления в точке контроля 11 изменяются от 0.14 до 0.41 МПа при длине аккумуляции взрывной газовой смеси  $x = 5, 10, 15$  и  $20$  м. В точке контроля 14 избыточное давление изменяется в диапазоне  $0.09 \div 0.04$  МПа. Это указывает на то, что наличие ветвей оказывает ослабляющий эффект на УВ. По мере прохождения ударной волной разветвлений длина аккумуляции газа перестает влиять на избыточное давление. Кроме того, установлено, что перепад избыточного давления в точках контроля 11–14, расположенных внутри различных ветвей, составляет примерно  $0.03 \div 0.05$  МПа. При  $x = 5$

и 10 м, избыточное давление равно 0.15, 0.05, 0.02 и 0 МПа в точках контроля 11, 12, 13 и 14 соответственно. Видно, что по мере увеличения длины аккумуляции газа значения избыточного давления в точках контроля 13 и 14, расположенных в третьей и четвертой ветвях, становятся ближе друг к другу, чем значения в точках контроля в первой и второй ветвях. При  $x = 15$  м из-за многократных отражений и взаимодействий ударной волны в туннеле эффект усиления интенсивности УВ наиболее выражен. При других интенсивностях взрыва также наблюдается взаимодействие УВ с локальными волнами, образовавшимися в ветвях туннеля. Поэтому с ростом расстояния от точки взрыва различие значений избыточного давления в точках контроля, расположенных внутри ответвлений, становится менее существенным.

## 2.5. Закон распространения взрывной волны в прилегающей выработке

Согласно полученным закономерностям изменения избыточного давления в различных моделях при изменении интенсивности взрыва и описанию процесса распространения УВ, приведенному в § 2.1, профиль избыточного давления УВ в прилегающей выработке более немонотонен, чем профиль в основной выработке. Далее рассмотрены изменения избыточного давления в моделях 1–4 с использованием данных в точке контроля 8, расположенной в прилегающей выработке, при длине аккумуляции газа 15 м. Как показывают рис. 10 и 11, в моделях 2, 3 и 4 избыточное давление в точке контроля 8 имеет три пика — в моменты времени 100, 108 и 119 мс.

Максимальное избыточное давление составляет 0.065, 0.079 и 0.127 МПа. Анализ процесса распространения УВ в главном туннеле показал, что основная УВ разделяется на несколько локальных волн в результате прохождения через сложную разветвляющуюся структуру каналов. Поэтому при наличии нескольких разветвлений флуктуации интенсивности УВ в прилегающем туннеле относительно невелики. При увеличении количества ветвей флуктуации давления на фронте УВ становятся значительными и ударная волна ускоряется. Из-за суперпозиции локальных вторичных волн в этом случае не наблюдается тенденции уменьшения максимума избыточного давления в контрольных точках, расположенных в прилегающем туннеле.

Сравним изменения избыточного давления и времени прихода УВ в точки контроля 3, 8 при изменении длины аккумуляции газа. Соответствующие графики представлены на рис. 12. Точка 3 является базовой точкой контроля в основном туннеле, а точка 8 — в прилегающем. Видно, что с увеличением длины аккумуляции газа постепенно увеличивается разница между первыми пиковыми значениями избыточного давления в точках

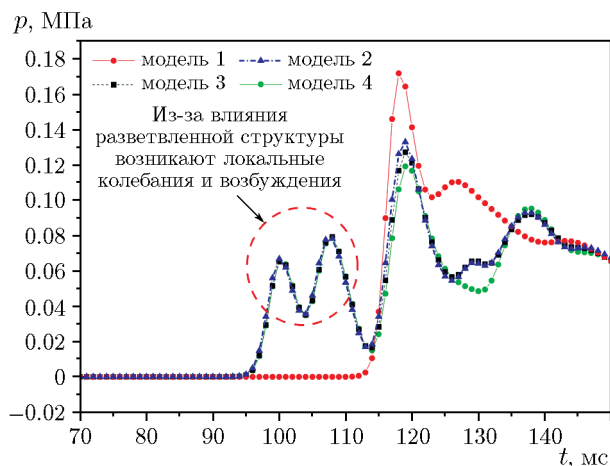


Рис. 10. Распределения избыточного давления в моделях 1–4 в точке контроля 8 при длине аккумуляции газа 15 м

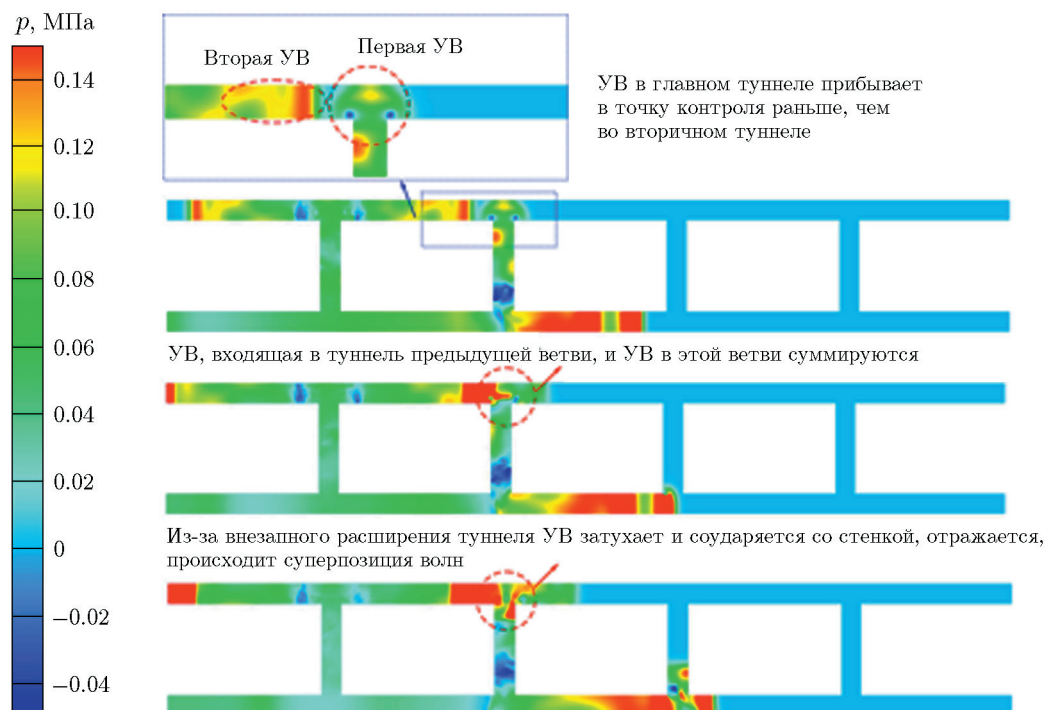


Рис. 11. Распределения избыточного давления в модели 4 при длине аккумуляции газа 15 м

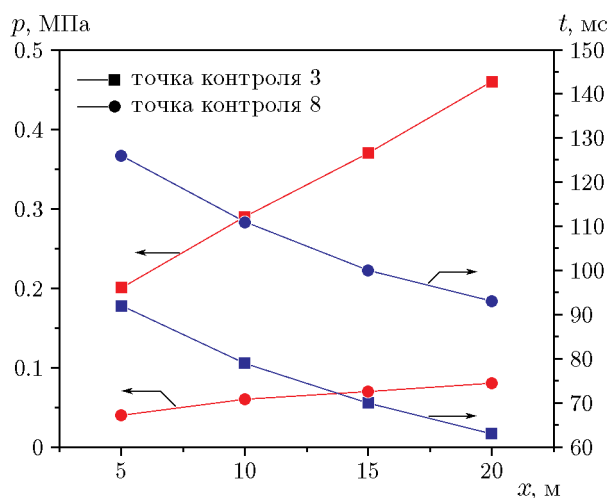


Рис. 12. Время прихода ударной волны и избыточное давление в точках контроля 3 и 8 в зависимости от длины аккумуляции газа

контроля 3 и 8 (линии 1), которые равны 0.16, 0.23, 0.3 и 0.38 МПа. Полученные данные свидетельствуют о том, что с увеличением интенсивности взрыва избыточное давление в прилегающем туннеле растет медленнее, чем в основном. В отличие от линии избыточного давления, линии, соответствующие моментам, в которые УВ приходит в точки контроля, находятся практически на одинаковом расстоянии друг от друга — 34, 32, 30 и 30 мс соответственно. Поэтому с увеличением интенсивности взрыва разница между первыми максимальными значениями избыточного давления в основном и прилегающем туннелях постепенно увеличивается. В то же время интервал между временами прихода УВ в контрольные точки практически одинаков.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В данной работе для моделирования развития взрыва газа используются модели туннелей с различным количеством ответвлений. Проанализированы законы изменения давления при различной концентрации газа в разных геометрических моделях. Основные выводы заключаются в следующем.

(1) Ударная волна имеет различную степень отражения и преломления в туннеле с разветвленной структурой, а коэффициент затухания ударной волны в основном туннеле изменяется нелинейно при увеличении длины аккумуляции газа.

(2) Особую роль в генерации локальных ударных волн играет разветвленная структура туннеля, однако на эффект ослабления ударной волны при увеличении числа разветвлений в меньшей степени влияет интенсивность самой ударной волны.

(3) В ответвлениях наблюдается вторичное повышение избыточного давления. В ответвлениях вдали от места взрыва интенсивность взрыва слабо влияет на избыточное давление.

(4) Из-за наличия разветвлений профиль избыточного давления за ударной волной в прилегающем туннеле изменяется в большей степени, чем в основном туннеле.

Хотя законы распространения взрывных ударных волн в угольных шахтах исследуются экспериментально и теоретически, основная проблема заключается в том, что реальная структура выработки более сложная, поскольку зависит от рельефа и горных условий. К тому же туннели имеют разные масштабы и расположены под разными углами. Кроме того, из-за увеличения глубины залегания угольных пластов и размеров туннелей выработок параметры угольных шахт могут быть изменены. Эти аспекты можно учесть при использовании упрощенных моделей, а также численного моделирования сопряженных задач, что должно быть учтено в будущей работе.

## ФИНАНСИРОВАНИЕ РАБОТЫ

Работа выполнена при поддержке фондов National Natural Science Foundation of China (No 51806247) и Science Foundation of China University of Petroleum, Beijing (Grant No 2462022YXZZ002).

## ЛИТЕРАТУРА

1. **National** Bureau of Statistics of the People's Republic of China. National Bureau of Statistics. Annual Data on Total Energy Consumption 2022. — Accessed 13 June, 2023.
2. **Bascompta M., Castañón A. M., Sanmiquel L., Oliva J.** A GIS-based approach: Influence of the ventilation layout on the environmental conditions in an underground mine // *J. Environ. Manag.* — 2016. — V. 182. — P. 525–530. — DOI: 10.1016/j.jenvman.2016.08.013.
3. **Li L., Qin B., Liu J., Leong Y.-K., Li W., Zeng J., Ma D., Zhuo H.** Influence of airflow movement on methane migration in coal mine goafs with spontaneous coal combustion // *Process Saf. Environ. Prot.* — 2021. — V. 156. — P. 405–416. — DOI: 10.1016/j.psep.2021.10.015.
4. **Si L., Li Z., Yang Y., Gao R.** The stage evolution characteristics of gas transport during mine gas extraction: Its application in borehole layout for improving gas production // *Fuel*. — 2019. — V. 241. — P. 164–175. — DOI: 10.1016/j.fuel.2018.12.038.
5. **Zhang X., Shen S., Yang M., Wang H., Ren J., Lu F.** Influence of length and angle of bifurcated tunnel on shock wave propagation // *J. Loss Prev. Process Ind.* — 2022. — V. 78. — 104802. — DOI: 10.1016/j.jlp.2022.104802.



6. **Zhu Y., Wang D., Shao Z., Xu C., Zhu X., Qi X., Liu F.** A statistical analysis of coalmine fires and explosions in China // *Process Saf. Environ. Prot.* — 2019. — V. 121. — P. 357–366. — DOI: 10.1016/j.psep.2018.11.013.
7. **Gao K., Liu Z., Wu C., Li J., Liu K., Liu Y., Li S.** Effect of low gas concentration in underground return tunnels on characteristics of gas explosions // *Process Saf. Environ. Prot.* — 2021. — V. 152. — P. 679–691. — DOI: 10.1016/j.psep.2021.06.045.
8. **Lei B., Zhao C., He B., Wu B.** A study on source identification of gas explosion in coal mines based on gas concentration // *Fuel.* — 2021. — V. 290. — 120053. — DOI: 10.1016/j.fuel.2020.120053.
9. **Lei B., Zhao C., Zhao Z., Wu B., Xu G.** Laboratory studies on remote method to assess the damage in underground mines after an emergency // *Process Saf. Environ. Prot.* — 2021. — V. 148. — P. 1337–1345. — DOI: 10.1016/j.psep.2021.03.011.
10. **Liu B.** *Fluent 19.0 Fluid Simulation from Introduction to Mastery.* — 1st ed. — Beijing: Tsinghua Univ. Press, 2019.
11. **Васильев А. А., Пинаев А. В., Трубицын А. А., Грачев А. Ю., Троцюк А. В., Фомин П. А., Трилис А. В.** Что горит в шахте: метан или угольная пыль? // *Физика горения и взрыва.* — 2017. — Т. 23, № 1. — С. 11–18. — DOI: 10.15372/FGV20170102. — EDN: XRPDIN.
12. **Li R., Si R., Gao K., Qin X., Wen L.** Experimental study on the effect of explosion suppression in low-concentration gas transportation // *J. Loss Prev. Process Ind.* — 2018. — V. 54. — P. 216–221. — DOI: 10.1016/j.jlp.2018.04.005.
13. **Пинаев А. В., Пинаев П. А.** Волны горения и детонации в смесях газов  $\text{CH}_4/\text{Air}$ ,  $\text{CH}_4/\text{O}_2$ ,  $\text{O}_2$  с взвесями каменного угля // *Физика горения и взрыва.* — 2020. — Т. 56, № 6. — С. 56–68. — DOI: 10.15372/FGV20200606. — EDN: ZTJLNE.
14. **Е Ц., Цзя Чж.-Чж.** Влияние разветвления канала на характеристики распространения детонации в газе // *Физика горения и взрыва.* — 2014. — Т. 50, № 4. — С. 61–65. — EDN: SKIOZJ.
15. **Li G., Wu J., Wang S., Bai J., Wu D., Qi S.** Effects of gas concentration and obstacle location on overpressure and flame propagation characteristics of hydrocarbon fuel-air explosion in a semi-confined pipe // *Fuel.* — 2021. — V. 285. — 119268. — DOI: 10.1016/j.fuel.2020.119268.
16. **Cao X., Fan L., Cui Y., Wang Z., Lu Y., Wei H.** Effect of connected vessels structure on methane explosion characteristics // *J. Loss Prev. Process. Ind.* — 2022. — V. 77. — 104789. — DOI: 10.1016/j.jlp.2022.104789.
17. **Chen D., Wu C., Li J., Liao K.** A numerical study of gas explosion with progressive venting in a utility tunnel // *Process Saf. Environ. Prot.* — 2022. — V. 162. — P. 1124–1138. — DOI: 10.1016/j.psep.2022.05.009.
18. **Gao K., Li S.-N., Han R., Li R.-Z., Liu Z.-M., Qi Z.-P., Liu Z.-Y.** Study on the propagation law of gas explosion in the space based on the goaf characteristic of coal mine // *Saf. Sci.* — 2020. — V. 127. — 104693. — DOI: 10.1016/j.ssci.2020.104693.
19. **Li J., Hao H.** Numerical and analytical prediction of pressure and impulse from vented gas explosion in large cylindrical tanks // *Process Saf. Environ. Prot.* — 2019. — V. 127. — P. 226–244. — DOI: 10.1016/j.psep.2019.05.019.
20. **Li Z., Chen L., Yan H., Fang Q., Zhang Y., Xiang H., Liu Y., Wang S.** Gas explosions of methane-air mixtures in a large-scale tube // *Fuel.* — 2021. — V. 285. — 119239. — DOI: 10.1016/j.fuel.2020.119239.
21. **Zhou A., Fan L., Wang K., Elsworth D.** Multiscale modeling of shock wave propagation induced by coal and gas outbursts // *Process Saf. Environ. Prot.* — 2019. — V. 125. — P. 164–171. — DOI: 10.1016/j.psep.2019.02.026.

22. **Si R. J.** Simulation research of gas concentration on explosion propagation // *Ind. Saf. Environ. Prot.* — 2011. — V. 37. — P. 29–30.
23. **Wang H., Cao T., Zhou X., Tan G., Xie J., Jiang W.** Research and application of attenuation law about gas explosion shock wave in coal mine // *J. China Coal Soc.* — 2009. — V. 34, N 6. — P. 778–782.
24. **Xie B., Luan Z., Chen D., Zhong S., Ding H., Du Y.** Influence of different bifurcation angles on the flame propagation of gas explosions in three-way bifurcated pipes // *ACS Omega.* — 2022. — V. 7, N 25. — P. 21845–21859. — DOI: 10.1021/acsomega.2c02016.
25. **Li R., Malalasekera W., Ibrahim S.** Numerical study of vented hydrogen explosions in a small scale obstructed chamber // *Int. J. Hydrogen Energy.* — 2018. — V. 43, N 34. — P. 16667–16683. — DOI: 10.1016/j.ijhydene.2018.07.078.
26. **Vermorel O., Quillatre P., Poinot T.** LES of explosions in venting chamber: A test case for premixed turbulent combustion models // *Combust. Flame.* — 2017. — V. 183. — P. 207–223. — DOI: 10.1016/j.combustflame.2017.05.014.
27. **Wang C., Zhao Y., Addai E. K.** Investigation on propagation mechanism of large scale mine gas explosions // *J. Loss Prev. Process Ind.* — 2017. — V. 49, pt B. — P. 342–347. — DOI: 10.1016/j.jlp.2017.07.011.
28. **Di Sarli V., Di Benedetto A., Russo G.** Using large eddy simulation for understanding vented gas explosions in the presence of obstacles // *J. Hazard. Mater.* — 2009. — V. 169, N 1-3. — P. 435–442. — DOI: 10.1016/j.jhazmat.2009.03.115.
29. **Di Sarli V., Di Benedetto A., Russo G.** Large eddy simulation of transient premixed flame-vortex interactions in gas explosions // *Chem. Eng. Sci.* — 2012. — V. 71. — P. 539–551. — DOI: 10.1016/j.ces.2011.11.034.
30. **Leonard A.** Energy cascade in large-eddy simulations of turbulent fluid flows // *Adv. Geophys.* — 1975. — V. 18, pt A. — P. 237–248. — DOI: 10.1016/S0065-2687(08)60464-1.
31. **Di Sarli V., Di Benedetto A., Russo G., Jarvis S., Long E. J., Hargrave G. K.** Large eddy simulation and PIV measurements of unsteady premixed flames accelerated by obstacles // *Flow, Turbul. Combust.* — 2009. — V. 83. — P. 227–250. — DOI: 10.1007/s10494-008-9198-3.
32. **Smagorinsky J.** General circulation experiments with the primitive equations: I. The basic experiment // *Mon. Weather Rev.* — 1963. — V. 91, N 3. — P. 99–164. — DOI: 10.1175/1520-0493(1963)091<0099:GCEWTP>2.3.CO;2.
33. **Fröhlich J., von Terzi D.** Hybrid LES/RANS methods for the simulation of turbulent flows // *Prog. Aerospace Sci.* — 2008. — V. 44, N 5. — P. 349–377. — DOI: 10.1016/j.paerosci.2008.05.001.
34. **Feldgun V. R., Karinski Y. S., Yankelevsky D. Z.** The effect of an explosion in a tunnel on a neighboring buried structure // *Tunn. Undergr. Space Technol.* — 2014. — V. 44. — P. 42–55. — DOI: 10.1016/j.tust.2014.07.006.
35. **Xue Y., Chen G., Zhang Q., Xie M., Ma J.** Simulation of the dynamic response of an urban utility tunnel under a natural gas explosion // *Tunn. Undergr. Space Technol.* — 2021. — V. 108. — P. 103713. — DOI: 10.1016/j.tust.2020.103713.
36. **Qiu J.** Study on propagation characteristics of shock wave in pipe network and simulation of catastrophic process for gas explosion: PhD Thesis / *Anhui Univ. of Sci. and Technol.* — Huainan, Anhui, 2018.
37. **Yang Y., Yang S., Fang Q., Xiang H., Sun W., Liu X.** Large-scale experimental and simulation study on gas explosion venting load characteristics of urban shallow buried pipe trenches // *Tunn. Undergr. Space Technol.* — 2022. — V. 123. — P. 104409. — DOI: 10.1016/j.tust.2022.104409.
38. **Wang Z. R.** Study on the dynamics of gas explosion process in confined space: PhD Thesis / *Nanjing Univ. of Technol.* — Nanjing, 2005.

39. **Bai C., Chang X., Zhang B.** Impacts of turbulence on explosion characteristics of methane-air mixtures with different fuel concentration // Fuel. — 2020. — V. 271. — 117610. — DOI: 10.1016/j.fuel.2020.117610.
40. **Ta L., Wang Z., Zhang B., Jiang Y., Li Y., Wang Q., Zhang T., Hua M., Pan X., Jiang J.** Experimental investigation on shock wave propagation and self-ignition of pressurized hydrogen in different three-way tubes // Process Saf. Environ. Prot. — 2022. — V. 160. — P. 139–152. — DOI: 10.1016/j.psep.2022.01.075.

*Поступила в редакцию 09.10.2023.*

*Принята к публикации 15.05.2024.*

---