

УДК 536.46:614.838

## ЧИСЛЕННОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК И АВАРИЙНЫХ ПОСЛЕДСТВИЙ ВЗРЫВА ОБЛАКА ВОДОРОДА В УСТАНОВКЕ ГИДРИРОВАНИЯ

Y.-H. Liu<sup>1,2</sup>, L. Bao<sup>1,3</sup>, H.-Z. Wang<sup>1,3</sup>, B.-Q. Xin<sup>1,2</sup>, A.-F. Yu<sup>1,3</sup>, C.-T. Ge<sup>1,2</sup><sup>1</sup>SINOPEC Research Institute of Safety Engineering Co., Ltd, Qingdao 266104, China, liuyanghao2012@163.com<sup>2</sup>SINOPEC National Petrochemical Project Risk Assessment Technical Center Co., Ltd, Qingdao 266104, China<sup>3</sup>State Key Laboratory of Safety and Control for Chemicals, Qingdao 266104, China

Опасность утечки и взрыва водорода при высоком давлении представляет серьезную угрозу безопасности установки гидрирования. На основе программного комплекса FLACS были смоделированы процесс взрыва и масштаб воздействия утечки водорода в установке гидрирования. Создана высокоточная трехмерная физическая модель установки гидрирования, и исследовано влияние эквивалентного соотношения (ER) на избыточное давление при взрыве облака водорода. Показано, что в диапазоне  $ER = 0.8 \div 1.4$  пиковая температура, скорость распространения пламени и пиковое избыточное давление, генерируемые взрывом облака водорода, сначала повышаются, а затем уменьшаются с увеличением эквивалентного соотношения ER. При  $ER = 1.05$  пиковые температура и избыточное давление достигают максимума, при этом скорость распространения пламени на 38.2 и 31.7 % выше, чем в случае  $ER = 0.8$  и 1.4 соответственно. В то же время ускорение пламени во время его распространения может эффективно способствовать увеличению избыточного давления взрыва внутри пламени. Результаты моделирования позволили предложить рекомендации по инженерному преобразованию зданий химических заводов в ударостойкие сооружения.

Ключевые слова: установка гидрирования, взрыв облака водорода, FLACS, закон распространения пламени, антидетонационная инженерная трансформация.

DOI 10.15372/FGV2023.9310

EDN JQMNNNA

### ВВЕДЕНИЕ

При транспортировке, использовании и хранении горючего газа возможна его утечка. При перемешивании с воздухом параметры смеси иногда выходят за пределы взрывобезопасности. При контакте смеси с источником воспламенения может произойти взрыв, называемый взрывом неограниченного облака пара (сокращенно UVCE) [1–3]. Водород обладает большим потенциалом аварийности, он характеризуется низкой плотностью (примерно в 14 раз ниже, чем у воздуха при стандартных температуре и давлении), высоким коэффициентом диффузии, низкой температурой воспламенения и широким пределом взрывного воспламенения (при объемной доле  $4 \div 75$  %) [4, 5]. В установке гидрирования водород является

основной средой. Изучение аварий в результате его утечки с последующим взрывом на установке гидрирования имеет важное значение для разработки способов противозрывной обработки заводских зданий и осуществления мер по предотвращению аварий.

Традиционно при моделировании аварий, связанных с утечкой водорода и его взрывом, в основном используется двумерное программное обеспечение, такое как DNV PHAST. Однако двумерное моделирование разделяет диффузию и взрыв после утечки газа во времени и пространстве и не учитывает блокирующий эффект рельефа местности и препятствий на заводе, что, очевидно, не соответствует реальной ситуации [6].

В последние годы появились новые численные алгоритмы. Например, программный комплекс FLACS (симулятор ускорения пламени), основанный на методах вычислительной

гидродинамики (CFD), постепенно становится профессиональным инструментом моделирования, который описывает взаимодействие пламени с устройствами, приспособлениями и трубопроводами и реализует преимущества трехмерного моделирования. Эффективность этого метода в сочетании с данными экспериментов была подтверждена в работах [7, 8] при анализе влияния на воспламенение и взрыв таких факторов, как свойства горючего газа, размер газового облака и наличие препятствий. В работе [9] в рамках модели FLACS изучали влияние концентрации метана в воздухе на избыточное давление взрыва. При концентрации 9.5 % избыточное давление оказалось больше, чем при двух других концентрациях — 6.5 и 12.5 %. В работе [10] проведено моделирование на основе FLACS взрыва облака пара на станциях приема сжиженного природного газа (СПГ) при различных сценариях воспламенения. Установлено, что при расположении источника воспламенения на краю газового облака избыточное давление взрыва меньше, чем при центральном воспламенении. В [11] путем объединения численного моделирования FLACS с экспериментальной проверкой выведена количественная зависимость между избыточным давлением взрыва и радиусом газового облака в окрестности резервуара сжиженного газа. В [12] на основе программ Fluent и FLACS были смоделированы характеристики распространения взрывной волны облака предварительно перемешанного газа при утечке из газопровода, оценено влияние препятствий на последствия взрыва, подтверждена надежность метода FLACS.

Подводя итог, можно сказать, что большинство текущих исследований в основном посвящены промышленным газам, таким как СПГ. Эти результаты сильно отличаются от результатов по утечке водорода и возможного последующего его взрывного воспламенения. Поэтому соответствующие выводы и правила для СПГ не могут быть напрямую применены для других случаев. Более того, анализ моделей для СПГ показал, что они в основном упрощают процесс, используются малый масштаб и простое распределение препятствий. Взрыв газового облака в сложных устройствах пока исследован недостаточно, и это может привести к определенным ошибкам в оценке последствий взрыва.

В данной статье выполнено высокоточное трехмерное моделирование процессов на хими-

ческом заводе с установкой гидрирования. На основе FLACS проведено моделирование взрыва облака газообразного водорода и исследовано влияние коэффициента эквивалентности на избыточное давление взрыва и закономерности распространения пламени, проанализирован возможный ущерб от избыточного давления. Полученные результаты легли в основу противозрывных мероприятий и предотвращения несчастных случаев и аварий на территории завода.

## 1. ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ

### 1.1. Коэффициент эквивалентности

Концентрация горючего газа является одним из важных параметров, влияющих на мощность взрыва облака пара [13]. В программном комплексе FLACS концентрация горючего газа характеризуется коэффициентом эквивалентности (сокращенно ER), который определяется как отношение количества воздуха, необходимого для полного сгорания горючего газа, к количеству фактически подаваемого воздуха [14]:

$$ER = (F/O)_{act} / (F/O)_{stoich},$$

где  $(F/O)_{act}$  — отношение массы горючего газа к массе кислорода в реальном процессе реакции взрывного горения;  $(F/O)_{stoich}$  — отношение массы топлива, способного выделять максимальное количество тепла, к кислороду, рассчитанное теоретически.

При исследовании влияния коэффициента эквивалентности на параметры взрыва другие параметры (такие, как температура окружающей среды, давление, размер ячейки и т. д.) остаются неизменными. Варьируется только коэффициент эквивалентности ER облака горючего газа. Согласно предыдущим исследованиям концепция эквивалентного газового облака (ESC) используется в программном обеспечении FLACS для прогнозирования избыточного давления при взрыве газа. Результаты показывают, что при  $ER = 0.85 \div 1.25$  моделируемое избыточное давление хорошо согласуется с экспериментальными результатами и существует определенная корреляция между ESC и избыточным давлением взрыва [15]. Поэтому в данной статье выбраны значения  $ER = 0.8 \div 1.4$  для сравнения с данными работы [16].

## 1.2. Математическая модель

### 1.2.1. Основные уравнения

В соответствии с характеристиками взрыва облака пара программный комплекс FLACS построен на основе законов сохранения массы, импульса, энергии с учетом турбулентности и химических реакций [17]. Модель турбулентности в FLACS описывается стандартной  $k$ - $\varepsilon$ -моделью, которая включает в себя уравнения для кинетической энергии турбулентности и скорости диссипации. Добавив для замыкания системы уравнение состояния газа, получаем соотношения [18, 19]:

уравнение состояния

$$pV = \frac{m}{M}RT, \quad (1)$$

где  $p$  — давление,  $T$  — температура,  $V$  — объем,  $R$  — универсальная газовая постоянная,  $m$  — масса вещества,  $M$  — молекулярная масса;

уравнение неразрывности

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho u_j) = 0; \quad (2)$$

уравнение импульсов

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho u_i) + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho u_j u_i) = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial \tau_{ij}}{\partial x_j}; \quad (3)$$

уравнение энергии

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t}(\rho E) + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho u_j E) = \\ = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \Gamma E \frac{\partial E}{\partial x_j} \right] - \frac{\partial}{\partial x_j}(p u_j) + \tau_{ij} \frac{\partial u_i}{\partial x_j}. \end{aligned} \quad (4)$$

Здесь  $x_{ij}$  — пространственные координаты; индексы  $i, j$  указывают на выбранную координатную ось;  $\rho$  — плотность;  $t$  — время;  $u_{ij}$  — составляющие вектора скорости в направлении соответствующей оси координат;  $E$  — удельная внутренняя энергия:  $E = c_v T + m_{fu} H_c$ ,  $c_v$  — удельная теплоемкость при постоянном объеме,  $m_{fu}$  — массовая доля топлива,  $H_c$  — тепловыделение;  $\Gamma$  — коэффициент турбулентной диффузии,  $\Gamma = \mu_t / \sigma$ ,  $\mu_t$  — турбулентная вязкость,  $\sigma$  — турбулентная постоянная Прандтля (она представляет собой меру подобию скоростных и температурных полей в потоке);  $\tau_{ij}$  — тензор вязких напряжений:

$$\tau_{ij} = \mu_t \left[ \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right] - \frac{2}{3} \delta_{ij} \left[ \rho k + \mu_t \frac{\partial u_i}{\partial x_j} \right].$$

Уравнения для кинетической энергии турбулентности  $k$  и скорости диссипации  $\varepsilon$  [20] имеют вид:

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t}(\rho k) + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho u_j k) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \left( \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + \\ + G_k + G_b - \rho \varepsilon - Y_m + S_k, \end{aligned} \quad (5)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t}(\rho \varepsilon) + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho u_j \varepsilon) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \left( \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right] + \\ + C_{1\varepsilon} \frac{\varepsilon}{k} (G_k + C_{3\varepsilon} G_b) - C_{2\varepsilon} \rho \frac{\varepsilon^2}{k} + S_\varepsilon, \end{aligned} \quad (6)$$

где  $\mu$  — вязкость;  $\mu_t = \rho C_\mu (k^2 / \varepsilon)$ ;  $G_k$  — член производства турбулентной кинетической энергии  $k$  вследствие среднего градиента скорости;  $G_b$  — член производства турбулентной кинетической энергии  $k$  вследствие плавучести;  $Y_m$  — вклад пульсационного расширения в сжимаемую турбулентность;  $\sigma_k$  — число Прандтля, соответствующее турбулентной кинетической энергии, равное 1.0;  $\sigma_\varepsilon$  — скорость диссипации, соответствующая числу Прандтля 1.3;  $S_k$ ,  $S_\varepsilon$  — определяемые пользователем исходные данные;  $C_{1\varepsilon}$ ,  $C_{2\varepsilon}$ ,  $C_{3\varepsilon}$ ,  $C_\mu$  — эмпирические константы, взятые согласно данным [21, 22] равными 1.44, 1.92, 0.80 и 0.09 соответственно.

### 1.2.2. Модель горения

Для замыкания системы уравнений используется модель горения горючего газа при взрыве после его утечки [23]:

$$\begin{aligned} \frac{\partial \rho Y_{fuel}}{\partial t} + \frac{\partial \rho u_j Y_{fuel}}{\partial x_j} = \\ = R_{fuel} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left( \rho D \frac{\partial Y_{fuel}}{\partial x_j} \right), \end{aligned} \quad (7)$$

где  $Y_{fuel}$  — массовая доля горючего,  $R_{fuel}$  — скорость химической реакции.

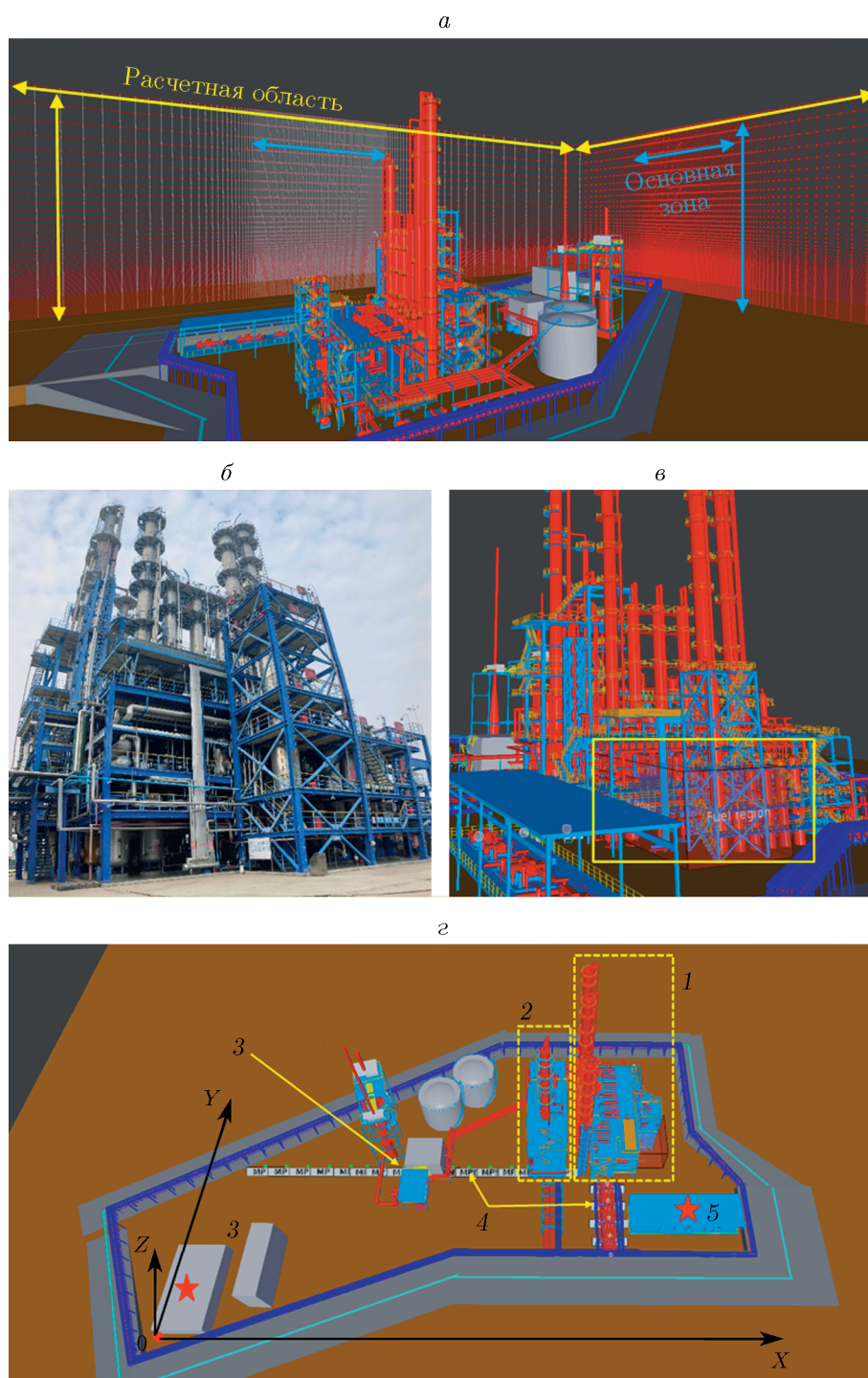


Рис. 1. Физическая модель и схема расчетной сетки:

а — общая схема модели и расчетная область исследования, б — фотография установки гидрирования, в — модель установки гидрирования и область газового облака, г — модель завода, вид сверху: 1 — установка гидрирования, 2 — топливная установка, 3 — примыкающее здание, 4 — точка мониторинга, 5 — зона компрессора

## 2. МОДЕЛЬ И ЕЕ ВЕРИФИКАЦИЯ

### 2.1. Построение физической модели и граничные условия

Для завершения построения трехмерной модели было использовано программное обеспечение для предварительной обработки CASD, созданное на базе комплекса FLACS. Основное внимание уделялось приборам, оборудованию и трубопроводам на заводе. Степень упрощения была максимально возможной. Физическая модель и расчетная сетка показаны на рис. 1. Исходя из принципа максимизации аварийности был выбран резервуар для водорода высокого давления, расположенный в середине устройства. Горизонтальный и вертикальный размеры области газового облака взяты в качестве основной области сетки, а вся площадь установки — в качестве расчетной области. Параметры расчетной сетки показаны на рис. 1, а–в. Поскольку обслуживаемые здания и компрессорная зона на территории завода находятся соответственно в направлениях  $X$  и  $Y$  от источника взрыва, через каждые 5 м вдоль этих осей в центре устройства были расположены точки измерения избыточного давления и температуры (см. рис. 1, г).

Считаем, что равномерное перемешивание водорода и воздуха происходит при начальной температуре 25 °С, скорость ветра равна местной среднегодовой скорости ветра 3.5 м/с, начальное давление 101.325 кПа, внутреннее оборудование и стены — границы расчетной области с соответствующими граничными условиями (жесткая непроницаемая стенка). Условия CFLC установлены на 5, CFLV установлен на 0.5, шероховатость грунта установлена на 0.1, атмосферная стабильность равна F, а время воспламенения равно 0.2 с [24].

### 2.2. Проверка корректности модели

Для взрыва водорода в открытом пространстве была специально спроектирована и построена экспериментальная установка. Точность имитационного расчета FLACS подтверждена экспериментами на уменьшенной модели в сочетании с результатами численного моделирования.

В эксперименте контейнер для хранения горючего газа представляет собой прямоугольную стальную конструкцию с длиной сторо-

ны 1 м, герметично затянутую полиэтиленовой пленкой толщиной 0.01 мм. На основе этой экспериментальной модели была создана трехмерная физическая модель FLACS, показанная на рис. 2. Результаты численного моделирования избыточного давления взрыва водорода были проверены экспериментально (концентрация водорода 30 %, количество препятствий 12, начальная скорость ветра 3.5 м/с).

Из сравнения экспериментальных и численных результатов по избыточному давлению (табл. 1) можно сделать вывод, что расчетное значение меньше экспериментального. Это связано с методом воспламенения, принятым в данном исследовании. Во FLACS используется заранее определенная область горения вместо искрового зажигания в экспериментах, т. е. в модели процесс воспламенения не учитывается, и модельное время действия избыточного давления меньше экспериментального. Кроме того, во время эксперимента накапливается некоторое избыточное давление перед прорывом пленки, в результате чего избыточное давление экспериментального взрыва оказывает-

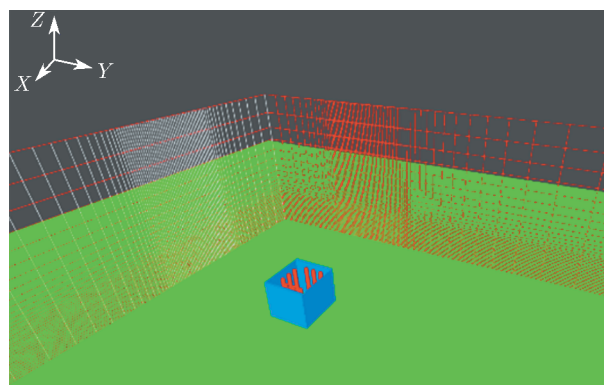


Рис. 2. Физическая модель эксперимента

Таблица 1

Сравнение экспериментальных и численных результатов по взрыву водорода

Точка измерения	$p$ , бар		Относительная ошибка, %
	эксперимент	расчет	
1	3.10	2.97	4.19
2	2.87	2.76	3.83
3	2.66	2.58	3.00
4	2.62	2.49	4.96
5	1.51	1.58	4.43

ся больше, чем при моделировании. Сравнивая результаты численного моделирования и эксперимента, можно сделать вывод, что максимальная относительная погрешность пикового избыточного давления составляет менее 5 %, что приемлемо в инженерных приложениях, и тем самым подтверждает, что расчетная модель избыточного давления взрыва и выбранные граничные условия являются разумными и выполнимыми.

### 3. АНАЛИЗ РЕЗУЛЬТАТОВ МОДЕЛИРОВАНИЯ

#### 3.1. Временная и пространственная эволюция пламени и волны давления

Анализируются процесс распространения и развития пламени при взрыве водородного облака и распределение избыточного давления на плоскости  $XOY$  при значениях коэффициентов, соответствующих возможности возникновения пламени в этой области. Согласно данным FLACS изменение температуры в расчетной области непосредственно указывает на опасность возникновения пламени в этой области. На рис. 3, а, б показано изменение структуры пламени при взрыве облака водорода, а на рис. 3, в — изменение избыточного давления в точках измерения на расстоянии  $d = 5, 10, 15, 20, 25, 30, 35, 40, 45$  и  $50$  м от границы газового облака. Как видно из рис. 3, а, в, взрыв газового облака делится на две стадии: невзрывное горение и дефлаграция. На стадии невзрывного горения ( $0 \div 0.28$  с) процесс подвергается небольшому возмущению, а после образования водородного облака при воспламенении образуется небольшой огненный шар без явного избыточного давления, который называется стадией внезапного возгорания. Через  $0.28$  с точка воспламенения становится центром горения и поверхность пламени расширяется наружу в форме сферы. Пламя становится неравномерным из-за загромождения оборудованием, строительными рамами и другими препятствиями в устройстве. Возникает турбулентность, которая приводит к непрерывному увеличению площади поверхности горения пламени с течением времени. Пламя нестабильно и ускоряется в процессе распространения. Избыточное давление также быстро повышается, что приводит к образованию зон с положительными и отрицательными значениями избыточного давления. Из кривой избыточного давления вид-

но, что максимальное положительное и максимальное отрицательное избыточное давление в точке измерения  $d = 5$  м от границы газового облака составляют  $123.5$  и  $-22.1$  кПа соответственно.

Из литературы и экспериментов известен предел терпимости человеческого тела и зданий к температуре пламени. При температуре  $315$  К человеческое тело испытывает боль, а при температуре  $453$  К человек сильно обгорает или погибает. При температуре  $673 \div 873$  К прочность стальной конструкции здания снижается, здание частично или полностью теряет несущую способность. К моменту времени от начала воспламенения  $t = 0.30$  с температура в центральной зоне установки гидрирования близка к  $2500$  К. Во время распространения пламени наружу площадь пламени взрыва быстро увеличивается, размеры пламени намного превышают первоначальные размеры облака горючего газа, а температура пламени по-прежнему составляет около  $1700$  К, главным образом потому, что под воздействием ударной волны при взрыве и турбулентности воздушного потока водород, который не участвует в реакции горения, выталкивается давлением в область первоначального газового облака, и после столкновения с кислородом происходит взрыв. В результате температура пламени остается высокой. При  $t = 0.35$  с пламя с температурой около  $1300$  К распространяется в зону компрессора к югу от точки взрыва радиусом около  $35$  м и площадью поражения  $3800$  м<sup>2</sup> и создает серьезную угрозу безопасности в зоне компрессора. Оборудование и трубопроводы в этой зоне находятся в области высокой температуры. Любая утечка легковоспламеняющегося газа из оборудования в данном районе немедленно вызовет вторичный взрыв. При  $t = 3.5$  с область высокотемпературного пламени исчезает и реакция воспламенения прекращается.

Ударная волна является одной из основных причин человеческих жертв и повреждения зданий. Избыточное давление ударной волны легче измерить и оценить, чем другие параметры, поэтому критерий избыточного давления часто используется для расчета ущерба от взрывной волны. В табл. 2 показан ущерб, наносимый различными уровнями избыточного давления при взрыве [25].

Как видно из пространственно-временной эволюции избыточного давления на рис. 3, б,



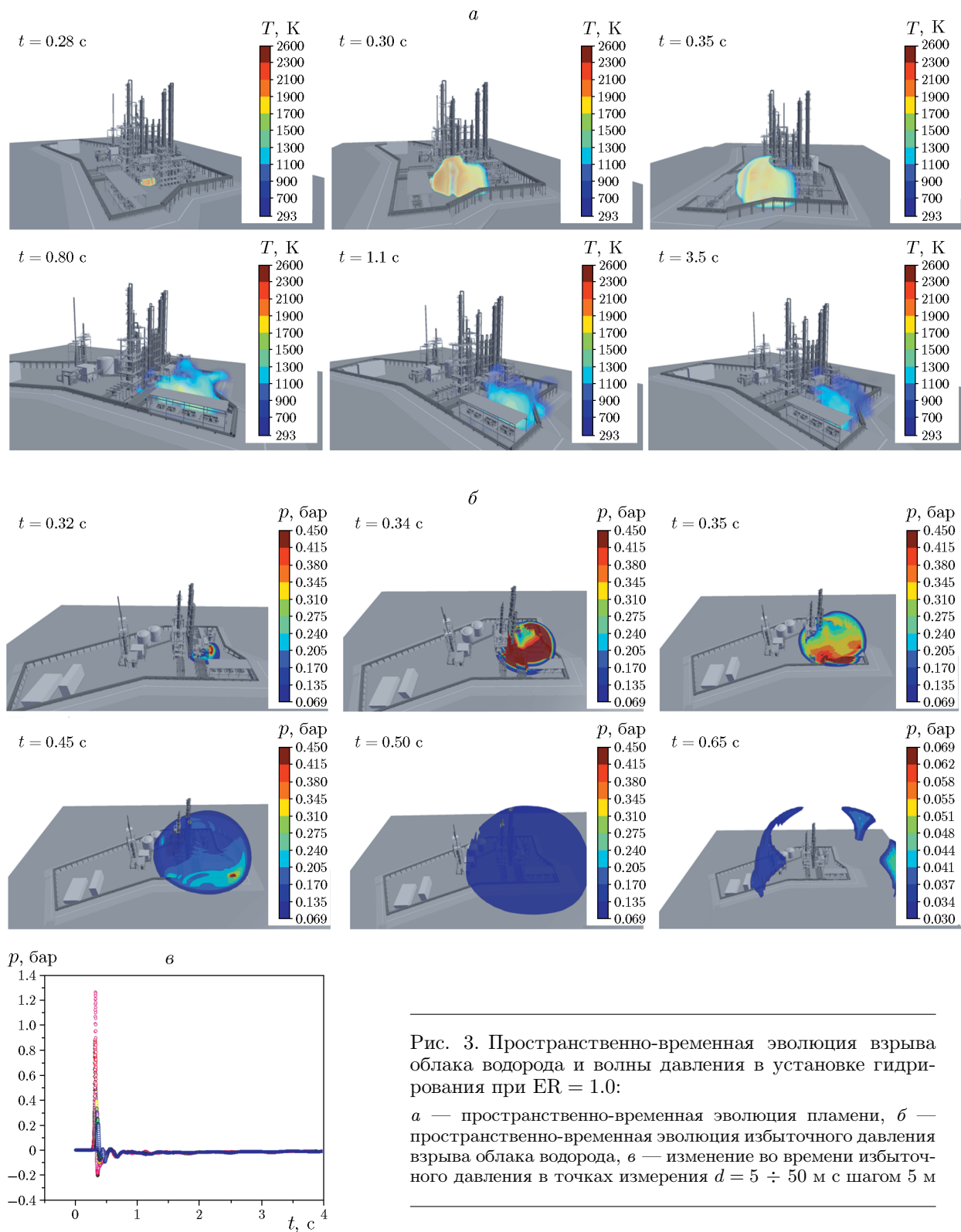


Рис. 3. Пространственно-временная эволюция взрыва облака водорода и волны давления в установке гидрирования при  $ER = 1.0$ :

*a* — пространственно-временная эволюция пламени, *б* — пространственно-временная эволюция избыточного давления взрыва облака водорода, *в* — изменение во времени избыточного давления в точках измерения  $d = 5 \div 50$  м с шагом 5 м

Таблица 2

Степень воздействия  
избыточного давления на людей и здания

Порог избыточного давления, кПа	Степень ущерба
Для зданий	
5.0 ÷ 6.0	Окна и двери частично повреждены
6.0 ÷ 15	Большая часть стекол окон и дверей разрушена
15 ÷ 50	Повреждены оконные рамы, появление трещин в стенах
50 ÷ 70	Ломаются деревянные опоры, слабеет общая конструкция помещений
70 ÷ 100	Ломаются деревянные опоры, слабеет общая конструкция помещений
100 ÷ 200	Ударные повреждения железобетона, обрушение небольших домов
Для людей	
20 ÷ 30	I степень, низкий риск (незначительные ушибы)
30 ÷ 50	II степень, средний риск (повреждение органов зрения, незначительное внутреннее кровоотечение и т. д.)
50 ÷ 100	III степень, высокий риск (тяжелые повреждения внутренних органов, возможная смерть)
>100	IV степень, высокий риск (смерть в большинстве случаев)

при  $t = 0.34$  с ударная волна распространилась в область компрессора с южной стороны от точки взрыва. При  $t = 0.35$  с область полностью охвачена избыточным давлением, и максимальное избыточное давление превышает 45 кПа. В соответствии с повреждения-

ми при избыточном давлении, приведенными в табл. 2, в этом случае персонал получит серьезные травмы или погибнет, а каркас здания и оборудование в зоне компрессора будут повреждены. Кроме того, здесь находится в основном водородное компрессорное оборудование, поэтому существует вероятность его повреждения и последующей вторичной аварии. При  $t = 0.65$  с ударная волна взрыва распространилась на жилое здание в районе завода, максимальное избыточное давление составило около 4.5 кПа. Согласно стандарту взрывозащитного проектирования зданий нефтехимической промышленности (GB/T50779-2022), при избыточном давлении взрыва менее 6.9 кПа нет необходимости во взрывозащитных преобразованиях основного корпуса здания. Однако избыточное давление приведет к определенной степени разрушения дверей и окон здания, поэтому их следует подвергнуть противовзрывной защите, чтобы избежать травмирования людей осколками стекла. Кроме того, наилучшее безопасное расстояние для защиты установки также может быть определено в сочетании с масштабом зон повреждения при высокой температуре.

### 3.2. Влияние коэффициента эквивалентности на характеристики взрыва водорода

Чтобы исследовать влияние коэффициента эквивалентности водородного облака на избыточное давление взрыва и характеристики распространения пламени, были проведены расчеты со значениями  $ER = 0.8, 1, 1.05, 1.2$  и  $1.4$ , при этом остальные параметры не изменялись. Численно моделировались последствия аварии при взрыве в различных условиях работы.

#### 3.2.1. Влияние коэффициента эквивалентности на температуру пламени

Точка мониторинга взята за пределами зоны взрыва. На рис. 4 показано, как изменяется во времени температура взрыва облака горючего газа, а на рис. 5 — как изменяется пламя взрыва облака водорода при различных значениях коэффициента эквивалентности. Как видно из этих рисунков, характер изменения температуры взрыва в одной и той же точке измерения в основном одинаков, но ее пиковое значение имеет тенденцию сначала увеличиваться, а затем уменьшаться с увеличением коэффициента эквивалентности. Это связано с тем,



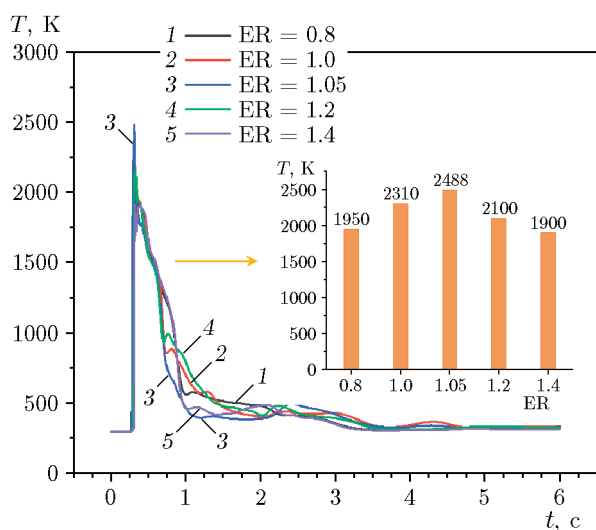


Рис. 4. Изменение температуры взрыва во времени в одной и той же точке мониторинга при различных значениях ER

что при  $ER = 0.8$  облако горючего водорода в устройстве находится в состоянии горения, богатом кислородом, горение недостаточно интенсивное, выделение тепла относительно низкое, а максимальная пиковая температура в зоне устройства составляет 1950 K. Однако при  $ER = 1.0$  водород вступает в полную реакцию, выделение тепла реакции становится наиболее интенсивным, а с увеличением значения ER облако водорода находится в состоянии горения с низким содержанием кислорода. В результате температура пламени взрыва повышается, а максимальный температурный пик составляет 2488 K. После этого, по мере того как коэффициент эквивалентности продолжает увеличиваться, расходует больше водорода и пиковая температура пламени уменьшается. Это согласуется с результатами исследования взаимосвязи последствий взрыва с концентрацией топлива [26], в котором отмечалось, что «наиболее опасное состояние при взрыве облака горючего газа несколько превышает коэффициент химического эквивалента». Кроме того, из-за турбулентного эффекта воздушного потока после взрыва несгоревший газ выталкивается наружу из газотранспортной системы и продолжает вступать в реакцию после столкновения с кислородом. Это приводит к увеличению колебаний температуры во времени.

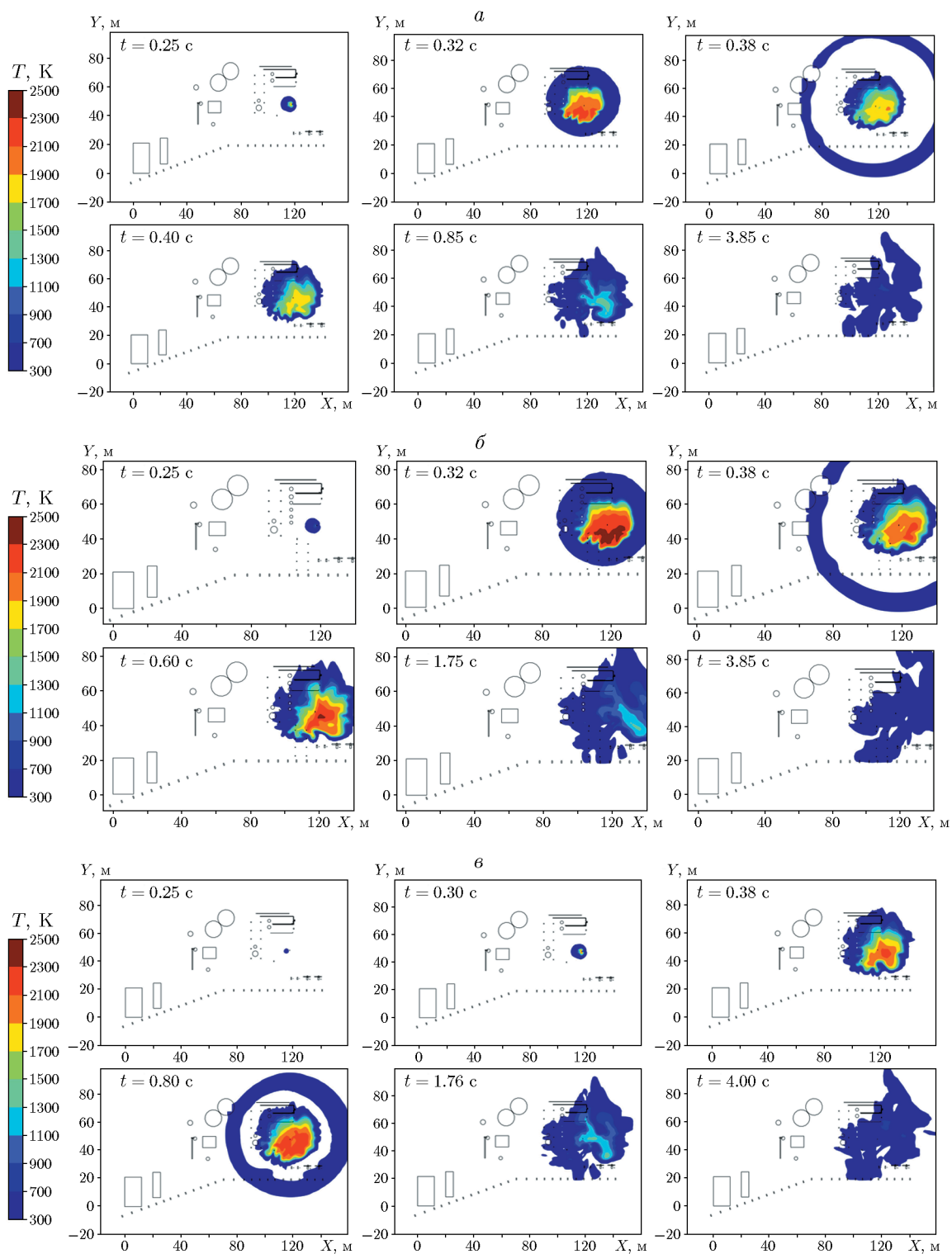
Далее были рассчитаны температуры в направлениях  $X$  и  $Y$  каждой точки измерения

при различных коэффициентах эквивалентности. На рис. 6 показано, как изменяется температура в каждой точке мониторинга. Как видно из рисунка, температура в направлении  $Y$  немного выше, чем в направлении  $X$ . Главным образом потому, что в направлении  $Y$  имеются устройства и другие препятствия, которые искажают пламя и ускоряют горение. В плоскости  $XOY$  при  $ER = 1.05$  температура взрыва может достигать более 2000 K в радиусе 45 м с точкой воспламенения в качестве начальной точки, и тенденция к снижению температуры пламени взрыва в пределах 45 м неочевидна. Через 45 м температура пламени взрыва резко падает с увеличением расстояния и достигает температуры окружающей среды.

### 3.2.2. Влияние коэффициента эквивалентности на скорость пламени

Скорость распространения пламени является одной из важных характеристик взрыва водородного облака. Возьмем в качестве примера точки контроля за пределами зоны действия устройства в направлении  $X$ . Соответствующие зависимости температуры взрыва, скорости горения и концентрации топлива в разное время при различных коэффициентах эквивалентности показаны на рис. 7. Чтобы рассчитать скорость распространения пламени при взрыве облака водорода в установке гидрирования при различных эквивалентных соотношениях, необходимо определить время появления пламени после взрыва, а затем рассчитать расстояние между двумя фиксированными точками измерения. Момент прохождения пламени через станцию MP1 обозначим  $t_1$ , через MP2 —  $t_2$ , задержка по времени будет  $\Delta t$ , расстояние между двумя станциями мониторинга обозначим  $\Delta l$ . Тогда для двух станций мониторинга средняя скорость распространения пламени равна  $\bar{v} = \Delta l / \Delta t$ . Результаты расчетов показаны на рис. 8.

Как видно из рис. 7, когда скорость горения  $RFU > 0$ , температура пламени взрыва также начинает повышаться, а концентрация топлива — существенно снижаться. Следовательно, время, соответствующее  $RFU > 0$ , определяется как время достижения пламенем точки измерения. Эквивалентное соотношение и начальная концентрация топлива оказывают определенное влияние на время появления пламени в каждой точке измерения. В диапазоне

Рис. 5. Изменение нефограмм пламени взрыва облака водорода при  $ER = 0.8$  (а),  $1.05$  (б),  $1.4$  (в)

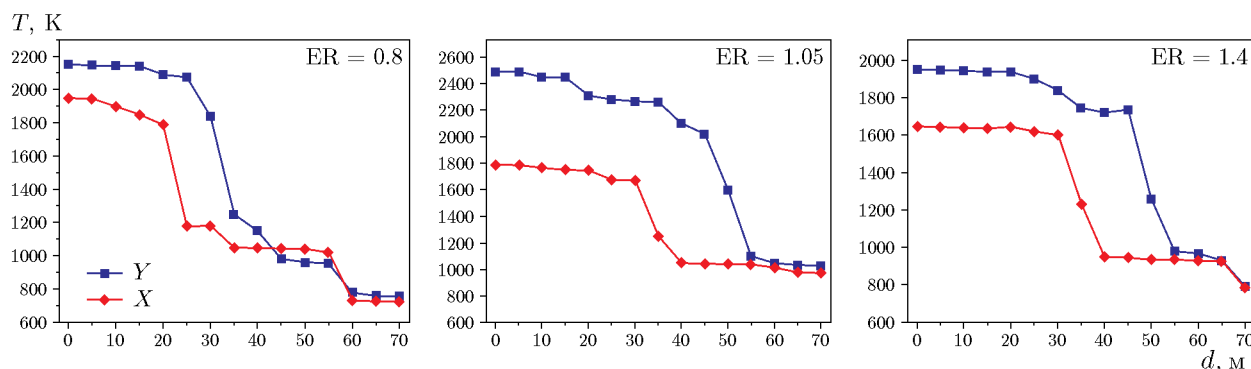


Рис. 6. Изменение максимальной температуры взрыва в точках мониторинга в направлениях  $X$  и  $Y$  в плоскости  $XOY$

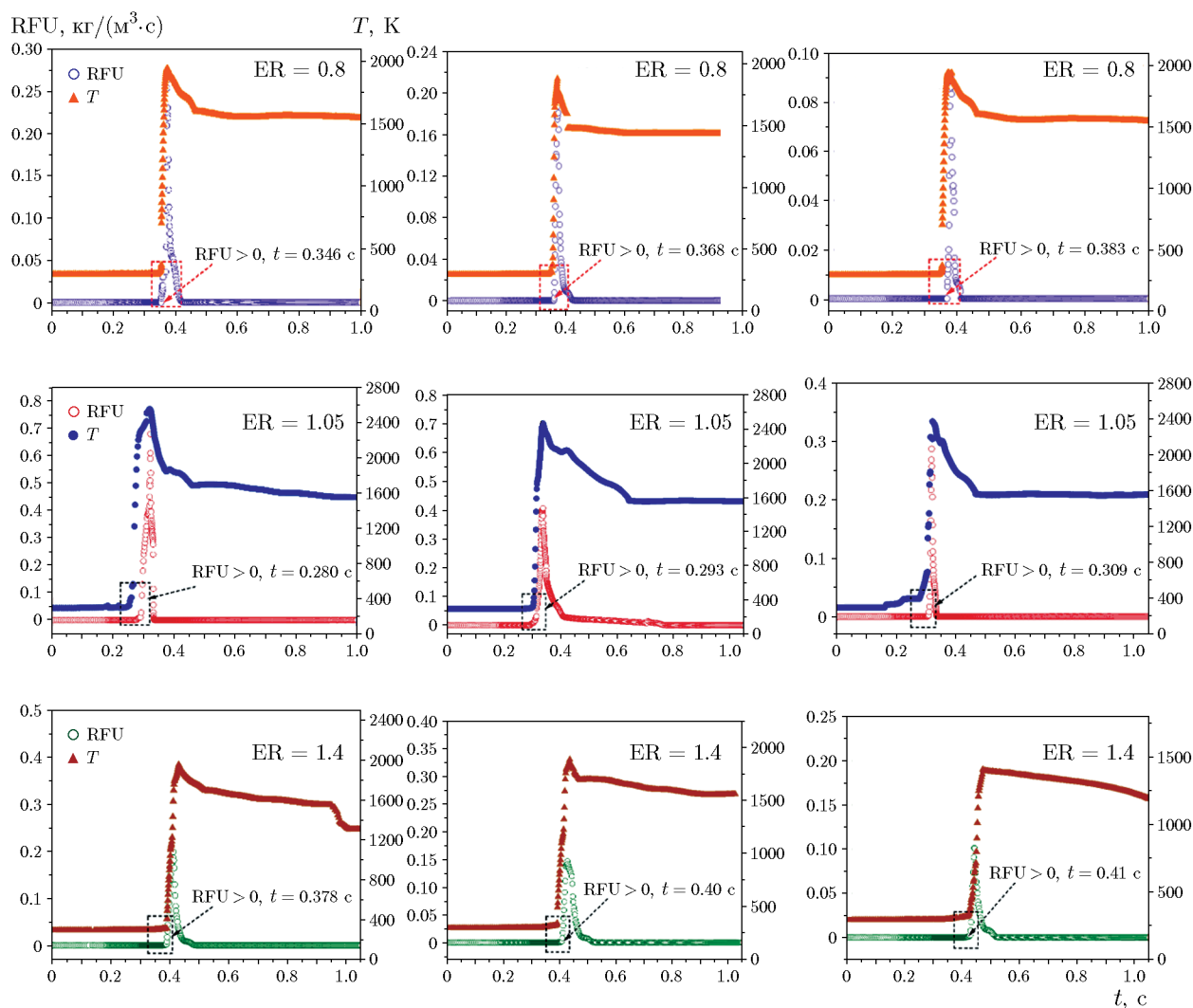


Рис. 7. Зависимости скорости горения пламени и температуры от времени при различных значениях  $ER$

$ER = 0.8 \div 1.4$  время, за которое пламя достигает первой точки контроля вне устройства, ведет себя по-разному с увеличением эквивалентного соотношения. При  $ER < 1.05$  время достижения точки пламенем сокращается с увеличением  $ER$ . При  $ER > 1.05$  время достижения точки измерения растет с увеличением  $ER$ . При  $ER = 1.05$  время, за которое пламя достигает первой точки контроля, самое короткое —  $t = 0.28$  с. Причина различий заключается в том, что при  $ER = 1.05$  облако газообразного водорода полностью вступает в реакцию и взрыв является наиболее интенсивным, а скорость распространения пламени — самой высокой. Это указывает на то, что когда стехиометрическое соотношение меньше этого значения (1.05), соответствующее увеличение концентрации оказывает определенное стимулирующее воздействие на скорость распространения пламени. При достижении стехиометрического соотношения газовое облако находится в состоянии горения с низким содержанием кислорода, и увеличение концентрации оказывает ингибирующее воздействие на скорость пламени, что приводит к уменьшению его скорости и увеличению времени достижения пламенем точки измерения.

Как видно на рис. 8, скорость пламени в точке измерения сначала растет, а затем уменьшается с увеличением коэффициента эквивалентности. При  $ER = 1.05$  скорость является максимальной и пламя достигает двух боковых точек со скоростью 372 и 450 м/с соот-

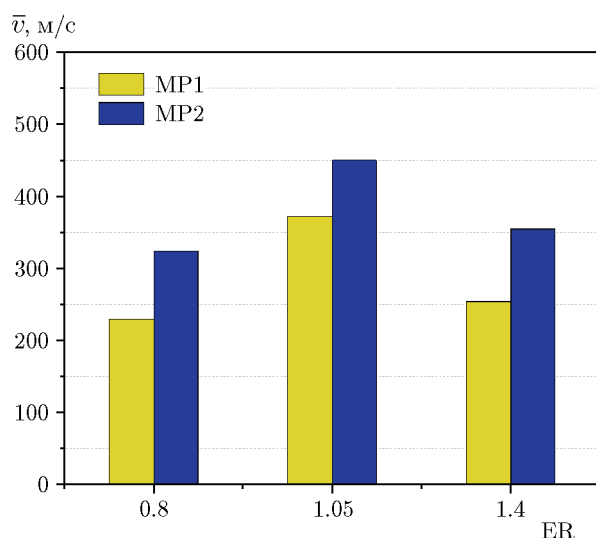


Рис. 8. Гистограмма скорости распространения пламени при различных значениях  $ER$

ветственно. По сравнению с  $ER = 0.8$  и 1.4 скорость пламени, распространяющегося до точки контроля MP1, выше соответственно на 38.2 и 31.7 %, а в точке контроля MP2 она увеличилась на 28.0 и 21.1 % соответственно.

### 3.2.3. Влияние коэффициента эквивалентности на избыточное давление при взрыве

Результаты численного моделирования избыточного давления взрыва в каждой точке мониторинга при различных значениях коэффициента эквивалентности, построенные в направлении оси  $X$ , приведены на рис. 9. Получены также изображения облака избыточного давления в пиковое время. Как видно на рис. 9, характер изменения избыточного давления при взрыве облака водорода во всех точках мониторинга в направлении  $X$  в основном одинаков — соответствует состоянию «одно положительное давление — одно отрицательное давление». Однако пик избыточного давления взрыва облака водорода  $p_{max}$  в некоторой степени зависит от коэффициента эквивалентности: при  $ER < 1.05$  пик увеличивается, а время его достижения сокращается; при  $ER > 1.05$  пик уменьшается, а время его достижения увеличивается.

Аналогичное изменение пика температуры пламени при  $ER = 0.8$  происходит при сгорании с низким содержанием топлива. Сгорание водорода является недостаточным, а пик избыточного давления в этом случае составляет 78 кПа. С увеличением концентрации водорода ускоряется химическая реакция с водородом в зоне установки и высвобождается больше энергии. Когда концентрация водорода достигает стехиометрии, водород полностью реагирует с кислородом. В это время пиковое избыточное давление при  $ER = 1.05$  составляет 127 кПа, что примерно в 1.62 раза выше, чем при  $ER = 0.8$ . По сравнению с  $ER = 0.5$  при  $ER = 1.2$  и 1.4 концентрация водорода больше, что соответствует горению с большим содержанием топлива и недостаточным сгоранием. Пиковое избыточное давление взрыва относительно невелико — 117.5 и 101.8 кПа соответственно. Это указывает на то, что по сравнению со стехиометрической концентрацией активность обогащенного топлива в процессе горения выше и опасность взрыва выше (т. е. по сравнению с пиковым избыточным давлением при  $ER = 0.8$  и 1.2). Однако при дальнейшем увеличении концентрации топлива (т. е.

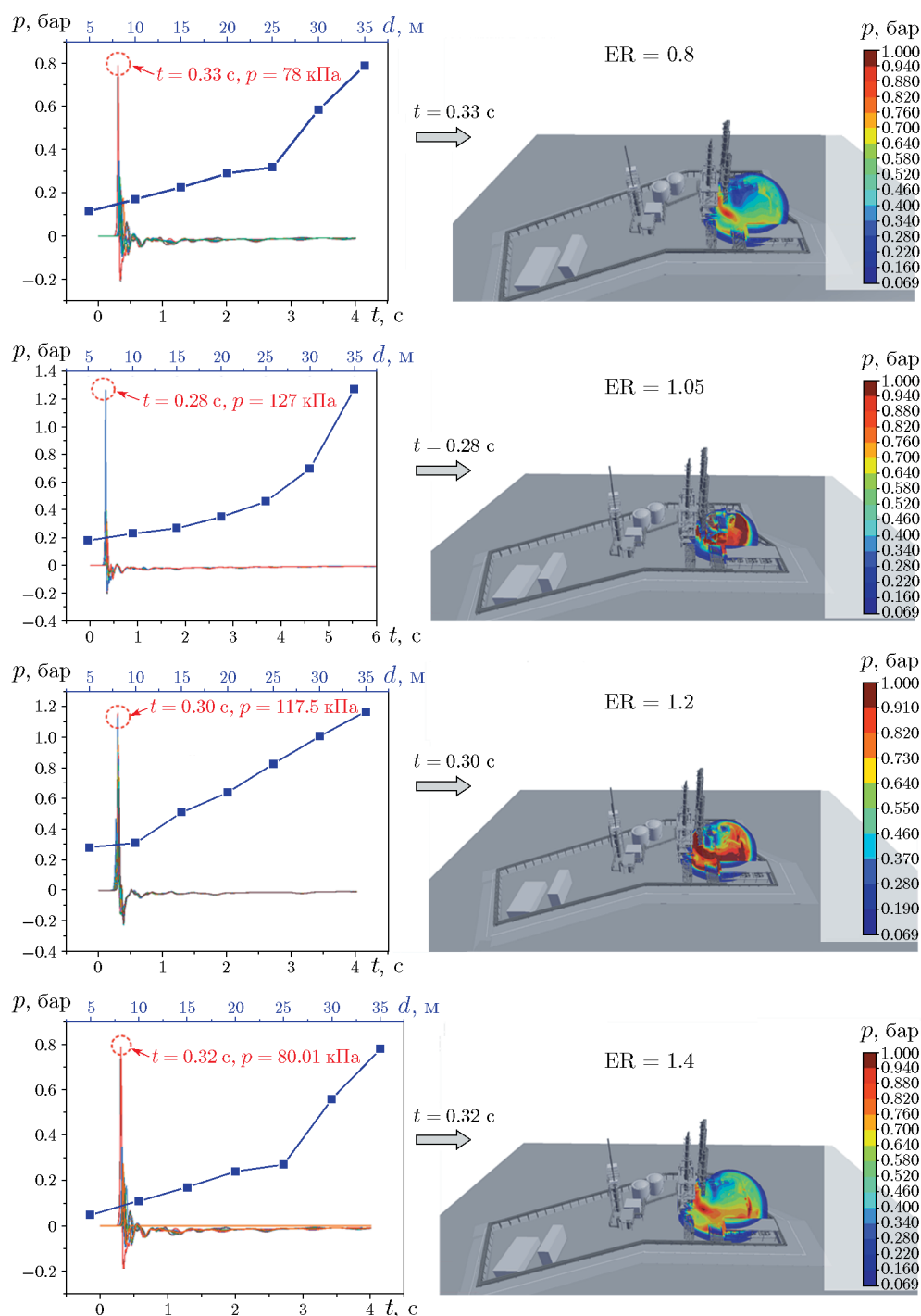


Рис. 9. Изменение пика избыточного давления и его нефограмма во время пика при различных значениях ER

по сравнению с пиковым избыточным давлением при  $ER = 1.2$  и  $1.4$ ) ясно, что чем больше концентрация топлива, тем очевиднее становится эффект ингибирования избыточного давления взрыва. Основная причина заключается в том, что из-за снижения содержания кисло-

рода не может поддерживаться химическая реакция в процессе взрыва, и давление взрыва снижается. Пиковое избыточное давление, создаваемое взрывом, аналогично тому, которое возникает при  $ER = 0.8$ .

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На основе программного обеспечения FLACS проведено численное моделирование взрыва облака водорода в установке гидрирования на химическом заводе. Выводы заключаются в следующем.

1. При взрыве водородного облака в установке гидрирования образуется зона высоко-температурного повреждения радиусом 35 м с точкой воспламенения в центре. Максимальная температура достигает более 2500 К, а максимальное избыточное давление составляет 127 кПа. По сравнению с пиковым избыточным давлением при коэффициенте эквивалентности  $ER = 1.05$  пиковое избыточное давление при  $ER = 0.8, 1.2$  и  $1.4$  снижается на 47, 9.6 и 46.99 кПа соответственно. Ускорение распространения пламени приводит к увеличению избыточного давления взрыва.

2. При различных значениях коэффициента эквивалентности температура пламени взрыва облака водорода, скорость распространения пламени и избыточное давление взрыва демонстрируют тенденцию сначала увеличиваться, а затем уменьшаться с ростом коэффициента. При  $ER = 1.05$  температура взрыва водородного облака, скорость распространения пламени и избыточное давление взрыва являются самыми высокими. Кроме того, если на пути распространения пламени возникнет препятствие, то это приведет к искажению пламени и ускорению горения.

3. При взрыве водорода при утечке его из установки гидрирования на химическом предприятии возникающее избыточное давление может нанести серьезный ущерб компрессорной зоне на южной стороне установки и может привести к возникновению вторичных аварий. Поэтому необходимо как можно скорее обнаружить и проконтролировать утечку горючего газа в установке, чтобы избежать образования газового облака большого объема. Кроме того, из-за большого расстояния между жилым зданием и установкой гидрирования избыточное давление взрыва, действующее на здание, составляет менее 6.9 кПа, т. е. нет необходимости в антидетонационной трансформации основного корпуса здания. Однако стены и остекление здания должны быть усилены.

## ФИНАНСИРОВАНИЕ РАБОТЫ

Исследование финансировалось National Natural Science Foundation of China — Project:

Research on numerical simulation method of fragment field of masonry structure in full time and space domain under the condition of gas cloud explosion (N 12002392); Project of Ministry of Science and Technology of Sinopec: Research on safety protection technology of large-scale hydrogenation master station (N A592).

## КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы данной работы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

## ЛИТЕРАТУРА

1. De Stefano M., Rocourt X., Sochet I., Daudey N. Hydrogen dispersion in a closed environment // *Int. J. Hydrogen Energy*. — 2019. — V. 44, N 17. — P. 9031–9040. — DOI: 10.1016/j.ijhydene.2018.06.099.
2. Mishra S., Mishra K. B. Numerical study of large-scale LNG vapour cloud explosion in an unconfined space // *Process Saf. Environ. Prot.* — 2021. — V. 149. — P. 967–976. — DOI: 10.1016/j.psep.2021.03.034.
3. Xin B. Q., Dang W. Y., Yan X. Q., Yu J. L., Bai Y. Z. Dispersion characteristics and hazard area prediction of mixed natural gas based on wind tunnel experiments and risk theory // *Process Saf. Environ. Prot.* — 2021. — V. 152. — P. 278–290. — DOI: 10.1016/j.psep.2021.06.012.
4. Wang Q., Luo X. J., Wang C. J., Liu Y., Zhou P. G., Lie B. Experimental study on external explosion for vented hydrogen deflagration in a rectangular tube with different vent coefficients // *Process Saf. Environ. Prot.* — 2022. — V. 158. — P. 331–339. — DOI: 10.1016/j.psep.2021.12.002.
5. Giannissi S. G., Shentsov V., Melideo D., Cariteau B., Baraldi D., Venetsanos A. G., Molkov V. CFD benchmark on hydrogen release and dispersion in confined, naturally ventilated space with one vent // *Int. J. Hydrogen Energy*. — 2015. — V. 40, N 5. — P. 2415–2429. — DOI: 10.1016/j.ijhydene.2014.12.013.
6. Zhang Y., Li Y., Dang W. Y., Wang Y. H., Liu D. Leakage accident simulation and detection coverage research of typical LNG filling stations // *China Saf. Sci. J.* — 2022. — V. 32, Iss. S1. — P. 108–113.
7. Jin Y. L., Jang B.-S. Determination of gas cloud shape for explosion risk analysis of offshore topside process area // *Process Saf. Environ. Prot.* — 2020. — V. 133. — P. 183–200. — DOI: 10.1016/j.psep.2019.11.012.
8. Jin Y. L., Jang B.-S. Probabilistic explosion risk analysis for offshore topside process area. Part I: A new type of gas cloud frequency distribution for time-varying leak rates // *J. Loss Prev. Process Ind.* — 2018. — V. 51. — P. 125–136. — DOI: 10.1016/j.jlp.2017.12.008.

9. **Li J. D., 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.
10. **Zeng Y. M., Ling X. D.** Numerical simulation of vapor cloud explosion in LNG receiving terminal // *Fire Sci. Technol.* — 2013. — V. 32, N 8. — P. 834–837.
11. **lv D., Tan W., Liu L. Y., Zhu G. R., Peng L.** Research on maximum explosion overpressure in LNG storage tank areas // *J. Loss Prev. Process Ind.* — 2017. — V. 49, Pt B. — P. 162–170. — DOI: 10.1016/j.jlp.2017.06.010.
12. **Wang Y. Z.** Overpressure characteristics study of premixed gas cloud explosion in natural gas pipeline leakage: PhD Thesis. — 2019.
13. **Wang W. T., Cheng Y. F., Yao Y. L., Zhang B. B., Wang Z. H., Liu S. H.** Effects of equivalence ratios on explosion characteristics and flame speeds of acetylene/air mixture // *J. Centr. South Univ. (Sci. Technol.)*. — 2022. — V. 53, N 2. — P. 433–442. — DOI: 10.11817/j.issn.1672-7207.2022.02.008.
14. **Ma Q. J., Zhang Q., Li D., Chen J. C., Ren S. Y., Lei S. S.** Effects of premixed methane concentration on distribution of flame region and hazard effects in a tube and a tunnel gas explosion // *J. Loss Prev. Process Ind.* — 2015. — V. 34. — P. 30–38. — DOI: 10.1016/j.jlp.2015.01.018.
15. **Wang Q. H., Wang L. W., Jiang J. C., Zhang M. G., Li X.** Simulation study on gas explosion induced by gas leakage of urban buried gas pipelines // *China Saf. Sci. J.* — 2021. — V. 31, N 9. — P. 75–82. — DOI: 10.16265/j.cnki.issn1003-3033.2021.09.011.
16. **Hansen O. R., Gavelli F., Davis S. G., Middha P.** Equivalent cloud methods used for explosion risk and consequence studies // *J. Loss Prev. Process Ind.* — 2013. — V. 26, N 3. — P. 511–527. — DOI: 10.1016/j.jlp.2012.07.006.
17. **Lucas M., Atanga G., Hiskens H., Mauri L., Skjold T.** Simulating vented hydrogen deflagrations: Improved modelling in the CFD tool FLACS-hydrogen // *Int. J. Hydrogen Energy*. — 2021. — V. 46, N 23. — P. 12464–12473. — DOI: 10.1016/j.ijhydene.2020.09.073.
18. **Li J. D., Hao H.** Internal and external pressure prediction of vented gas explosion in large rooms by using analytical and CFD methods // *J. Loss Prev. Process Ind.* — 2017. — V. 49, Pt B. — P. 367–381. — DOI: 10.1016/j.jlp.2017.08.002.
19. **Cen K., Song B., Huang Y., Wang Q. S.** CFD simulations to study parameters affecting gas explosion venting in compressor compartments // *Math. Problems Eng.* — 2017. — V. 2017, N 4. — 1090561. — DOI: 10.1155/2017/1090561.
20. **Ren S. Y.** The leakage low temperature diffusion and explosion and explosion of liquefied natural gas in open space // *Explos. Shock Waves*. — 2018. — V. 38, N 4. — P. 891–897. — DOI: 10.11883/bzycj-2016-0323.
21. **Abidi S. H., Hasan M. M.** Variation of turbulent kinetic energy due to dimples in intake manifold for diesel engine // *Case Studies Therm. Eng.* — 2021. — V. 27. — 101299. — DOI: 10.1016/j.csite.2021.101299.
22. **Moen A., Mauri L., Narasimhamurthy V. D.** Comparison of  $k-\epsilon$  models in gaseous release and dispersion simulations using the CFD code FLACS // *Process Saf. Environ. Prot.* — 2019. — V. 130. — P. 306–316. — DOI: 10.1016/j.psep.2019.08.016.
23. **Hu Q., Qian X., Shen X., Zhang Q., Ma C., Pang L., Liang Y., Feng H., Yuan M.** Investigations on vapor cloud explosion hazards and critical safe reserves of LPG tanks // *J. Loss Prev. Process Ind.* — 2022. — V. 80. — 104904. — DOI: 10.1016/j.jlp.2022.104904.
24. **Liang D., Singer S.** Automated combustion model classification for char particle distributions using 3-D morphology analysis and pore-resolving CFD simulations // *Fuel*. — 2023. — V. 335. — 127020. — DOI: 10.1016/j.fuel.2022.127020.
25. **Vyazmina E., Jallais S.** Validation and recommendations for FLACS CFD and engineering approaches to model hydrogen vented explosions: Effects of concentration, obstruction vent area and ignition position // *Int. J. Hydrogen Energy*. — 2016. — V. 41, N 33. — P. 15101–15109. — DOI: 10.1016/j.ijhydene.2016.05.189.
26. **Huang Y., Zhang Q., Ma Q. J.** Effect of fuel concentration on the flow field in flammable vapor cloud deflagration // *China Science Paper*. — 2013. — N 8. — P. 804–815.

*Поступила в редакцию 20.02.2023.*

*После доработки 16.05.2023.*

*Принята к публикации 11.10.2023.*