# Исследование противопожарных характеристик портового резервуара для хранения сырой нефти на основе Pyrosim

Фэнюнь Чен [a], Чао Хань [b,*]

Научно-исследовательский центр технологий безопасности и чрезвычайных ситуаций, Китайский научно-исследовательский институт водного транспорта, Пекин, Китай

achenfy@wti.ac.cn, hanchao@wti.ac.cn

Абстрактный. Для изучения влияния скорости ветра на процесс развития пламени, форму пламени пролива и распределение теплового излучения после возникновения пожара по всей поверхности портового резервуара для хранения сырой нефти в программе Pyrosim была создана модель пожара резервуара для хранения сырой нефти объемом 50000м³ при различных скоростях ветра. Численное моделирование показывает, что после того, как в одном из резервуаров произошел пожар по всей поверхности бассейна, тепловое излучение, получаемое соседними резервуарами, при большой скорости ветра превышает критическое значение теплового излучения, которое очень легко перекинуться в пожар многотанкового бассейна. С увеличением скорости ветра высота и длина пламени пожара бассейна постепенно уменьшаются, а угол наклона пламени увеличивается. С увеличением скорости ветра зона сильного излучения постепенно распространяется в направлении с подветренной стороны, и в резервуаре с подветренной стороны может возникнуть авария с непрямым распространением пожара в бассейне.

Ключевые слова: сырая нефть; резервуар для хранения; пожар в бассейне; численн

## 1 Введение

В условиях быстрого развития экономики Китая объем перевозок опасных грузов по водным путям Китая продолжает неуклонно расти. В настоящее время Китай построил в портах более 8000 резервуаров для хранения опасных грузов общей емкостью более 100 миллионов кубических метров и годовым оборотом более 500 миллионов тонн. Типы хранения и транспортировки в основном включают сырую нефть, очищенную нефть, природный газ и жидкие химические продукты[1]. Существует множество хранилищ и транспортных средств для портовых резервуаров, большой объем погрузочно-разгрузочных операций и относительно сконцентрированные места хранения. Существуют большие потенциальные риски для безопасности и скрытые опасности несчастных случаев. Аварии с пожарами и взрывами в нефтяных резервуарах в стране и за рубежом происходили неоднократно, вызывая серьезную угрозу социальной безопасности и гибель людей и имущества[2].

В типичном режиме пожара наибольший диапазон опасности имеет полноповерхностный пожар бассейна [3]. Наиболее серьезным воздействием после пожара резервуара для хранения является тепловое излучение. Пожарный резервуар выделяет большое количество теплового излучения, что приводит к возгоранию или даже взрыву соседнего резервуара. В то же время большое количество радиации

© The Author(s) 2025

K. Yuen et al. (eds.), Proceedings of the 2025 International Conference on Engineering Management and Safety Engineering (EMSE 2025), Advances in Engineering Research 267,
https://doi.org/10.2991/978-94-6463-780-9_18

Тепло, выделяющееся при сгорании масла, также представляет серье зную угрозу для жизни инспекторов и пожарных.

В стране и за рубежом исследования пожаров в крупных нефтяных резервуарах в основном проводятся с трех аспектов: эксперимент, те оретический анализ и численное моделирование. С развитием экспе риментов по пожарам в больших нефтяных резервуарах и технологи и численного моделирования использование программного обеспеч ения численного моделирования для анализа пожаров в больших не фтяных резервуарах становится все более и более обширным. Pourker amat[4] исследовал влияние размеров бассейна и расстояния до него на структурное поведение тонкостенных резервуаров. Ахмед [5] изуч ил картину распространения катастрофы по принципу домино под вл иянием пожара. Результаты показывают, что падающий тепловой по ток из-за наклона пламени удваивается по величине с увеличением на четыре порядка вероятности эскалации для наиболее пострадавш его танка, усиливая его уязвимость.

При численном моделировании пожаров в крупных резервуарах д ля хранения сырой нефти обычно рассматриваются частые сценарии возгорания. Существует мало исследований наиболее серьезных сце нариев пожаров по всей поверхности, а моделирование последствий крупных пожаров в резервуарах для хранения сырой нефти при разл ичных ветрах окружающей среды не носит систематического характе ра. Основываясь на этом, в данной статье используется численное м оделирование для анализа формы пламени, распределения тепловог о излучения и его ущерба для персонала в результате пожара в бассе йне с жидкостью по всей поверхности со скоростью ветра 0-10 м / с в резервуаре для хранения 50 000 м $^3$, обычно используемом в районе р езервуара для сырой нефти на основе пиросима, который обеспечив ает справочную информацию для анализа рисков безопасности и экс тренной помощи при пожарах в резервуарах для хранения сырой не фти.

## 2 Материалы и методы

### 2.1 Имитационная модель

В данной статье для численного моделирования используется програ ммное обеспечение Pyrosim. Точность результатов трехмерного моде лирования пожара, полученного с помощью программного обеспече ния, была проверена различными экспериментами и широко исполь зуется при моделировании пожаров в больших помещениях, таких к ак заводы, подземные переходы и здания [6].

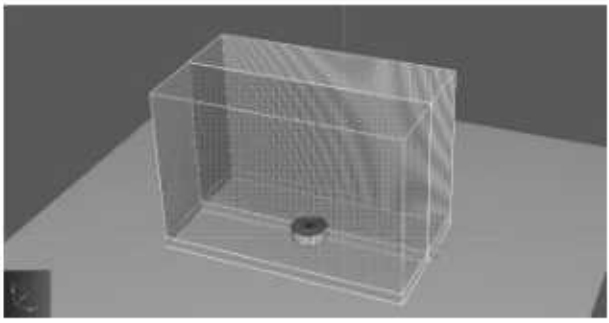


Рис. 1. Численная модель, расположение сетки и детектора

В этой статье построен резервуар для хранения с внутренней плава ющей крышей емкостью 50 000 м $^3$ и внутренним диаметром × высотой φ 60,0 м × 20,0 м, а также создана соответствующая численная модель м оделирования. Размер расчетной области составляет

установлено значение 210 м×120 м×300 м, используется равномерная кубическая сетка. Размер сетки составляет 1,5 м×1,5 м×1,5 м, всего около 9 миллионов сеток. В то же время детектор радиационного теплового потока расположен с наветренной и с подветренной стороны резервуара-хранилища. В плоскостях высоты резервуара (20,0 м). От края резервуара до 3-кратного диаметра детектор потока теплового излучения располагается с интервалом в 0,1 диаметра резервуара, как показано на рис. 1.

## 2.2 Параметры материала

В процессе моделирования материалом резервуара для хранения является стальная пластина, материалом грунта является бетон, четыре боковые и верхние поверхности окружающей области численного моделирования устанавливаются на границу ОТКРЫТО, а для масляного бака и земли устанавливается граница INERT, что позволяет избежать накопления тепла в области сетки и повлиять на результаты моделирования. Значения параметров теплофизических и химических свойств[7] приведены в таблице 1.

Таблица 1. Таблица параметров теплофизических и химических свойств материалов

| parameters | material | |
|---|---|---|
| | *Steel* | *Concrete* |
| Thermal conductivity ( W/m·K ) | 49.8 | 1.0 |
| specific heat ( kJ/kg·K ) | 0.47 | 0.8 |
| Thermal diffusivity (%) | $1.77\times10^{-5}$ | $5.7\times10^{-7}$ |
| Material thickness (m) | 0.1 | 1.0 |
| Density (kg / $m^3$) | 7900 | 2400 |
| Emissivity (%) | 0.45 | 0.95 |

## 2.3 Параметры моделирования

Настройка параметров моделирования включает в себя время моделирования и условия окружающей среды. В этой статье среднегодовая температура в районе резервуара-хранилища составляет 15,2 °C, среднегодовое атмосферное давление — 101,6 кПа, среднегодовая относительная влажность — 80%, а время моделирования — 60 с.

Поскольку порт прекращает работу, когда ветер превышает шесть уровней, в этой статье в качестве моделируемой скорости ветра выбрано 0–10 м/с с интервалом 1 м/с для точного изучения закона влияния скорости ветра.

## 2.4 Настройка источника огня

В Pyrosim установка источника огня является очень важной частью. Текущий имитационный расчет обычно рассчитывает фиксированную скорость тепловыделения на единицу площади путем объединения теплофизических и химических свойств топлива с моделью расчета скорости сгорания.

Скорость сгорания сырой нефти составляет 0,0732 кг/($м^2$с), рассчитанная по формуле Бабраускаса. В сочетании с теплофизическими и химическими свойствами сырой нефти, указанными в Таблице 2,

медианное значение эффективности сгорания составляет 0,765, а ско рость тепловыделения на единицу площади сырой нефти рассчитыва ется как 2373 кВт/м$^2$.

ТаТаблица 2. Таблица параметров теплофизических и химических свойств сырой нефти

| parameter | material |
|---|---|
| combustion heat (kJ/kg) | 42700 |
| maximal combustion rate (Kg/m$^{2)}$ | 0.027-0.119 |
| Density (kg/m$^3$) | 783 |
| Thermal conductivity (W/m·K) | 0.14 |
| specific heat (kJ/kg·K) | 2.4 |
| combustion efficiency (%) | 0.68-0.85 |

### 2.5 Ограничения моделей и параметров

Из-за ограничений Pyrosim в настройке геометрической модели цили ндрический резервуар невозможно построить напрямую. В этой стат ье цилиндрический резервуар приближенно заменен комбинацией нескольких треугольных призм. В то же время из-за сложных характе ристик сырой нефти параметры, заданные при численном моделиро вании, не могут полностью соответствовать реальным свойствам, а р езультаты расчетов будут давать определенные ошибки. Однако наст ройка параметров была максимально практичной, и погрешность на ходится в пределах контролируемого диапазона.

## 3 Результаты и обсуждение

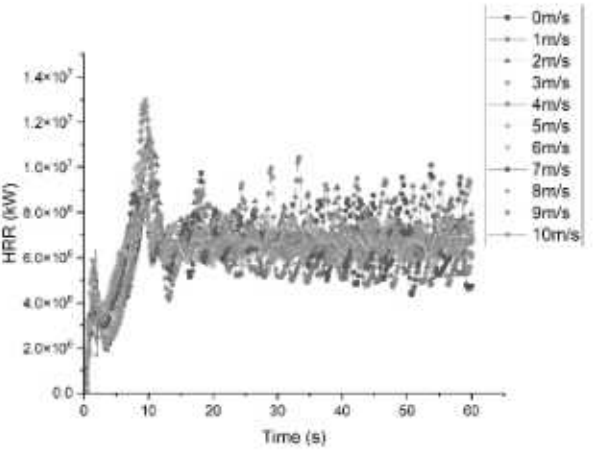
### 3.1 Анализ скорости тепловыделения пламени (HRR)

Из рис. 2(а) видно, что в открытой среде время, необходимое для сгор ания сырой нефти от воспламенения до наиболее интенсивного горе ния, очень мало, достигая пика около 10 с. Этот пик представляет соб ой максимальную стадию развития пламени, причем пик скорости те пловыделения здесь явно скачет. Из рис. 2(б) видно, что по мере увел ичения скорости ветра ветер обеспечивает больше кислорода для го рения и способствует реакции горения. Поэтому пик HRR увеличивае тся и достигает максимума при скорости ветра 3 м/с. После этого резе рвуар находится в нестабильном состоянии на начальном этапе горе ния из-за ветра, и его воздействие подавляет ветер, способствуя эфф екту горения, поэтому пик HRR снижается. Когда скорость ветра соста вляет 10 м/с, значение HRR примерно на 16,2 % ниже пикового значен ия HRR при статическом ветре и на 34,9 % ниже, чем при скорости вет ра 3 м/с. После этого этапа скорость тепловыделения постепенно сни жается и диапазон колебаний сокращается.

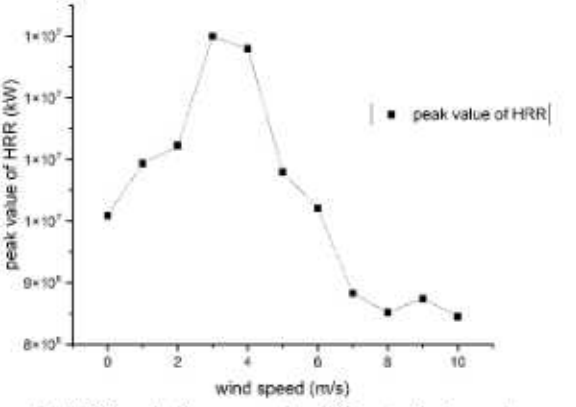
### 3.2 Анализ морфологии огненного шлейфа

Сырая нефть состоит из различных углеводородов с высоким содерж анием углерода, и при сгорании выделяется большое количество чер ного дыма. Пламя над черным дымом и топливом называется огненн ым шлейфом, который разделен на чистую зону горения.

и зону охвата дымовых газов. На рис. 3 показана форма шлейфа огня при устойчивом горении резервуара после сплошного пожара. Видно , что зона чистого горения расположена внизу видимого слоя пламен и, высота невелика, а энергия теплового излучения чрезвычайно вел ика. зона охвата дымовых газов расположена над зоной чистого сгор ания, где находится большое количество частиц дыма.




(a) HRR trend diagram under different wind speeds




(b) HRR peak diagram under different wind speed

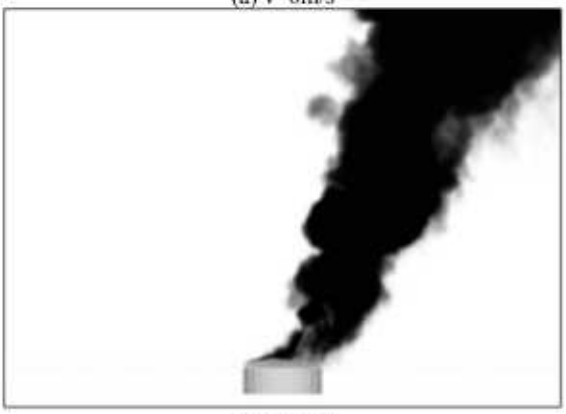
Рис. 2. Численная модель, расположение сетки и детектора

Моделируя и наблюдая за динамической морфологией факела пла мени, также можно увидеть, что на ранней стадии горения масла пла мя движется вверх и вниз под действием плавучести, что обусловлен о областью отрицательного давления, образующейся в нижней части пламени и жидком уровне масла. В этой области вдыхается большое количество воздуха, образуя бурлящую воздушную массу, что привод ит к пульсации пламени, столбу дыма или грибовидному увлечению. С увеличением времени концентрация дымовых газов, образующихс я при горении, становится все больше и пламя ослабевает. Однако п о мере того, как сжигание нефти становится все более и более достат очным, в сочетании с эффектом разбавления

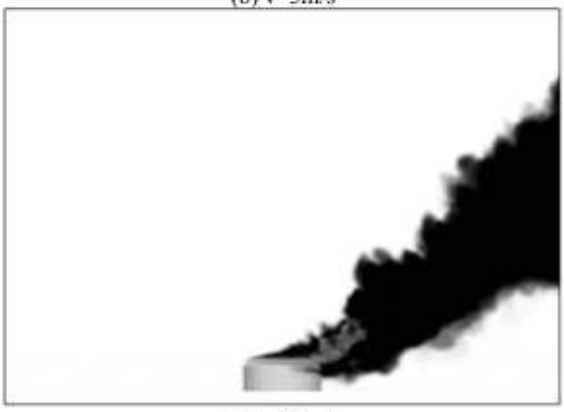
ветра, концентрация дымовых газов уменьшается, и пламя становится все более очевидным.



(a) v=0m/s



(b) v=5m/s



(c) v=10m/s

Рис. 3. Форма шлейфа пожара при различной скорости ветра

### 3.3 Влияние скорости ветра на форму бассейна Fi re

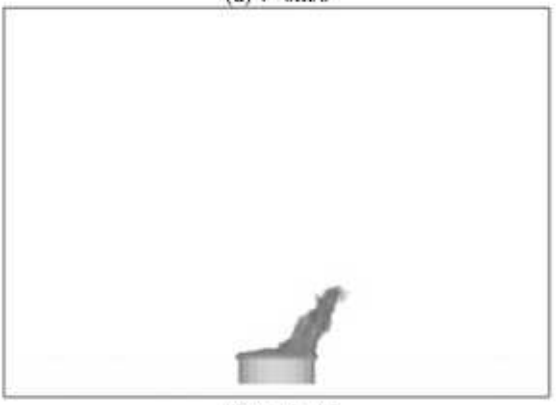
На рис. 4 (а) представлена диаграмма формы пламени при устойчиво м пожаре в бассейне в безветренную погоду. Видно, что пламя имеет примерно коническую форму. На рис. 4(б) представлена диаграмма ф ормы пламени при скорости ветра 5 м/с. Видно, что все пламя наклон ено под определенным углом в сторону подветренной стороны. В это время самая высокая точка всего пламени больше не располагается в вертикальном направлении центра резервуара.

На рис.4(в) показаны геометрические характеристики пламени при различных скоростях ветра. Геометрические характеристики пламен и можно грубо определить по карте распределения температуры пол я течения. Высоту пламени можно получить, вычитая высоту уровня жидкости из самой высокой точки пламени. Высота пламени при ско рости ветра 1~ 10м/с показана на рис.4(в), что находится между верхн им и нижним пределами эмпирической формулы.

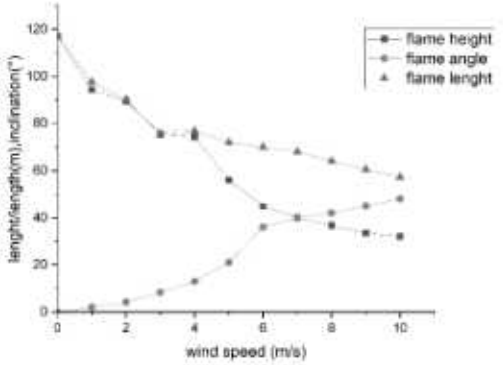
Линейное расстояние между самой высокой точкой пламени и цен тром поверхности жидкости — это длина пламени. Из рис. 4 (в) видно, что тенденция изменения длины пламени в основном такая же, как и высота пламени, и постепенно уменьшается по мере увеличения ско рости ветра.



(а) v=0m/s



(б) v=5м/с




(c) Flame parameters at different wind speeds

Рис. 4. Форма очага пожара и параметры пламени

По мере увеличения скорости ветра угол наклона пламени увеличивается. Когда она достигает 10 м/с, угол наклона пламени достигает даже 48°. При таком угле наклона резервуар в подветренном направлении может привести к непрямому распространению огня в бассейне, что в конечном итоге приведет к серьезным последствиям аварии.

### 3.4 Влияние скорости ветра на интенсивность теплового излучения

Интенсивность теплового излучения обычно определяется величиной теплового излучения, создаваемого пламенем аварийного резервуара. Согласно правилам Американской ассоциации инженеров-химиков, в этом документе значение теплового излучения, превышающее 13,5 кВт/м$^2$, определяется как зона сильного излучения[8].

На рис. 5 показано распределение теплового излучения при различных скоростях ветра. Видно, что область с большой плотностью теплового потока в условиях пожара в основном сосредоточена над резервуаром для хранения, а также имеется некоторое тепловое излучение вокруг резервуара для хранения, но явление затухания очень очевидно. Скорость ветра оказывает большое влияние на распределение теплового излучения вблизи резервуара. С увеличением скорости окружающего ветра зона сильного излучения постепенно распространяется в подветренном направлении, и в резервуаре для хранения в подветренном направлении может возникнуть авария с непрямым распространением пожара в бассейне.

На рис. 6 показана область распространения сильного излучения на уровне жидкости в резервуаре-хранилище при различных скоростях ветра. Диаметр резервуара для хранения в этой статье составляет 60,0 м. Согласно спецификациям Китая, минимальное расстояние между центром аварийного резервуара и соседним резервуаром для хранения составляет 54,0 м (красная область на рис. 6). При скорости ветра 10 м/с самое дальнее расстояние между зоной сильного излучения с подветренной стороны и центром аварийного резервуара составляет 83,0 м. После пожара на всей поверхности бассейна соседний резервуар для хранения подвергается непосредственному воздействию зоны сильной радиации, вызванной резервуаром.

Извлекаются значения теплового излучения аварийного резервуара с подветренной стороны и высота уровня жидкости (z=20,0 м) в резервуаре. Как показано на рис. 7, значение теплового излучения, создаваемого пожаром бассейна, сначала резко уменьшится, а затем уменьшится.

медленно в направлении от аварийного танка. Скорость ветра оказы вает большое влияние на распределение теплового излучения вблиз и резервуара. Когда расстояние от резервуара близко, значение тепл ового излучения достигает максимума при скорости ветра 10 м/с. Ког да расстояние от резервуара большое, значение теплового излучени я достигает максимума при скорости ветра 6 м/с.



(a)v=0m/s

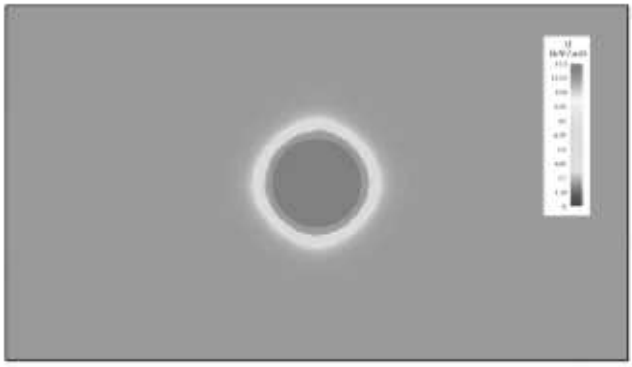


(б) v=5м/с

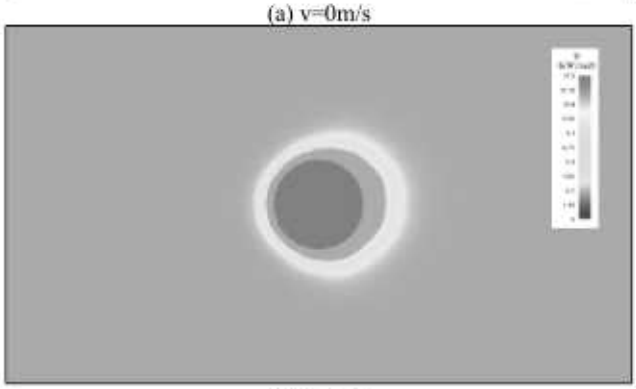


(c) v=10

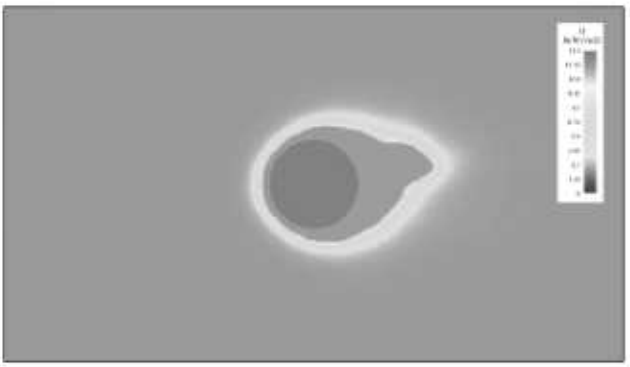
Рис. 5. Форма очага пожара и параметры пламени



(a) v=0m/s



(b) v=5m/s



(c) v=10

Рис. 6. Форма очага пожара и параметры пламени

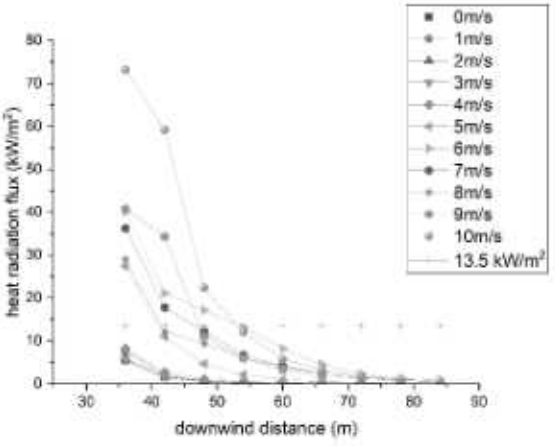



Рис. 7. Распределение теплового излучения при различных скоростях ветр а в подветренном направлении при высоте уровня жидкости (z = 20,0 м) ава рийного резервуара.

## 3.5 Чрезвычайные стратегии

Согласно результатам численного моделирования, зона сильной рад иации постепенно распространяется вниз с увеличением скорости ве тра, и в резервуаре для хранения с подветренной стороны может воз никнуть авария с непрямым распространением пожара в бассейне. К ак только в порту появится резервуар для хранения сырой нефти, по жаротушение и спасение должны строго следовать основному принц ипу: «сначала контролировать, а затем одновременно тушить, закупо ривать и осушать». Основная задача – быстро перекрыть все материа лы, подающие и соединительные трубопроводы горящего резервуар а, и открыть аварийный запорный клапан соседнего резервуара. При контроле пожара также необходимо обеспечить охлаждающую защи ту окружающих резервуаров для хранения, чтобы уменьшить вторич ные бедствия, вызванные эффектом домино.

## 4 вывода

1) В соответствии с расстоянием между резервуарами, определенным китайскими спецификациями, после того, как в одном из резервуаро в происходит пожар по всей поверхности бассейна, тепловое излуче ние, получаемое соседними резервуарами при большой скорости вет ра, превышает критическое значение теплового излучения, которое очень легко перерастает в пожар в бассейне с несколькими резервуа рами.

2) При ветре высота и длина пламени бассейна постепенно умень шаются с увеличением скорости ветра. По мере увеличения скорости ветра угол наклона пламени увеличивается, а при достижении 10 м/с угол наклона пламени достигает 48°.

3) В процессе пожара на всей поверхности бассейна зона сильной радиации в основном концентрируется в пространстве над нефтяны м резервуаром аварийного резервуара и постепенно распространяет ся вниз с увеличением скорости окружающего ветра. Скорость ветра оказывает большое влияние на распределение теплового излучения вблизи резервуара, и в резервуаре, расположенном с подветренной с тороны, может возникнуть авария с непрямым распространением по жара в бассейне.

## Ссылки

1. Хуан М.Л., Чен Ф.Ю., Ма М.Л. (2023) Строительство места пожара и взрыва 2 . ЛЮ Ж. Х. (2017) Анализ мер по ликвидации и спасению при пожаре жидкост и в хранилищах. Э Л (0) (0) Наука о чрезвычайных ситуациях, (0), 2 радиационны х характеристик пожара в резервуаре с нефтью. Общественная безопасность лиге за. Академическое издание (0), 2 Наука о безопасности и 5) Числен ная среда турбулентности, нестабильность, пламя и тепло в, пожар в резервуаре с нефтью. Журнал химической промышленности и инженерии, (0) 7 Анализ аварий, вызванных пожаром, и неопред еленности в инженерных системах. Часть А: Гражданское строительство. 5. Ашер М.А., Мохаммад Н.С., Айнул М.А. и др. (2022) Подход к моделированию CFD для прогнозирования 6. Рая Хакки Исмаил, Омар Х. Харуфа. (2023) Влиян ие формы углов плана на скорость распространения огня в высотных здани ях. Международный журнал безопасности и защиты 7. ЧЖАН М., СОНГ В.Х., В АН Дж. и др. (2014) Анализ моделирования последствий аварий 8. Huang K, Li Q, Xu J и др. (2019) Исследование влияния скорости ветра на распределение теплового излучения при пожаре резервуарного бассейна на нефтебазе. Те пловая наука и технология, 18 (05): 386-391.

Открытый доступ Эта глава лицензируется в соответствии с условиями между народной лицензии Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 (http://creativeco mmons.org/licenses/by-nc/4.0/), которая разрешает любое некоммерческое исполь зование, совместное использование, адаптацию, распространение и воспрои зведение на любом носителе или в любом формате при условии, что вы укаж ете первоначальный автор(ы) и источник, предоставите ссылку на лицензию Creative Commons и укажете, были ли внесены изменения.
Изображения или другие материалы третьих сторон в этой главе включены в лицензию Creative Commons этой главы, если иное не указано в ссылке на мате риал. Если материал не включен в лицензию Creative Commons главы, и ваше п редполагаемое использование не разрешено законодательством или превы шает разрешенное использование, вам необходимо будет получить разреше ние непосредственно от владельца авторских прав.

