

**Семенов Игорь Витальевич**

курсант

**Макаров Евгений Юрьевич**

магистр, преподаватель

Колледж имени Дважды Героя Советского Союза Маршала

Советского Союза В.И. Чуйкова

г. Москва

DOI 10.21661/r-575375

## **АНАЛИЗ РЕЗУЛЬТАТОВ ЧИСЛЕННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ УСЛОВНОГО ПОЖАРА В КОМПЬЮТЕРНОЙ ПРОГРАММЕ PYROSIM**

***Аннотация:** обеспечение пожарной безопасности является важным фактором устойчивого социально-экономического развития. В эпоху цифровизации на помощь в расчетах параметров моделей условных пожаров приходят компьютерные программы. В статье рассматривается пример использования программ PyroSim для численного моделирования характеристик условного пожара на автозаправочной станции (АЗС).*

***Ключевые слова:** модель пожара, численное моделирование пожара, пожар на автозаправочной станции, модель пожара на АЗС, PyroSim, модель PyroSim для АЗС, пожарная безопасность.*

Согласно статистическим данным МЧС России [1–17], к основным причинам возникновения пожаров на автозаправочных станциях относится неосторожное обращение с заправочными пистолетами и с огнем: при утечке топлива на поверхность земли образуется очаг пожара. На большинстве АЗС заправочные колонки располагаются в центральной части под навесом, поэтому проведем моделирование условного пожара следующим образом: место возгорания – топливозаправочная колонка (ТРК); сценарий пожара – открытое горение, возникшее из-за утечки топлива по причине неправильной эксплуатации в процессе заправки; расположение очага пожара – возле топливозаправочной колонки АЗС (под навесом).

Поскольку навес расположен рядом со зданием условной АЗС, для расчетов потребуются параметры навеса и параметры здания АЗС (табл. 1).

Таблица 1

Параметры расчетной модели

№	Наименование элемента модели	Длина, м	Ширина, м	Высота, м
1	Навес	17	14	7
2	Здание АЗС	15	4	3

Моделирование условного пожара будем проводить в специальной компьютерной программе PyroSim [11]. Трехмерная модель условной АЗС, составленная программой PyroSim, представлена на рис. 1.

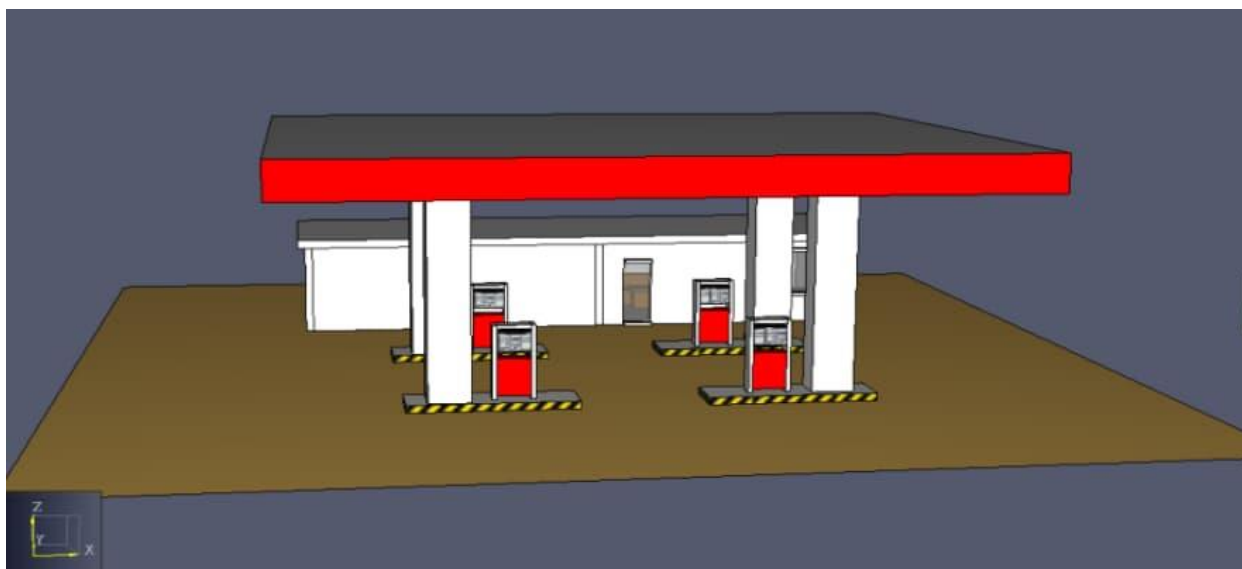


Рис. 1. Трехмерная модель в программе PyroSim

Здание условной АЗС в нашей модели имеет две двери и три окна, в здании расположены три помещения:

- помещение в левой части – электрощитовая, в которой размещаются электрокабели, распределительные устройства и другое оборудование;
- помещение в центральной части здания – подсобное, используемое для хранения вспомогательных заправочных материалов и противопожарного оборудования;
- помещение в правой части здания – комната дежурного персонала, используемая для отдыха дежурного персонала и других сотрудников. В этом по-

мещении находятся деревянный стол, диван, металлический шкаф для хранения документов.

При работе с программой PyroSim важно правильно расположить элементы исследуемого объекта. План помещения АЗС и топливораздаточных колонок, находящихся под навесом, показан на рис. 2.

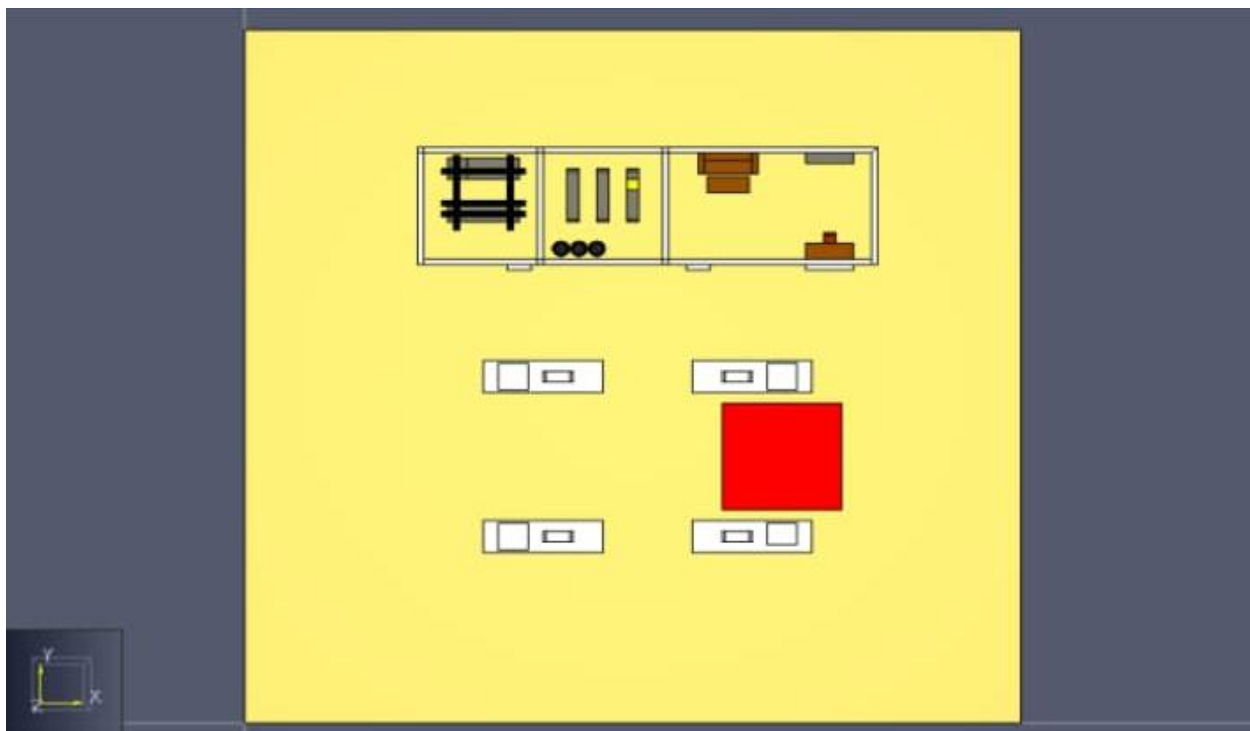


Рис. 2. План помещения АЗС и ТРК, находящихся под навесом  
(план составлен в программе PyroSim [11])

Очаг пожара представлен на рис. 2 ярким квадратом.

Для построения геометрической модели объекта в программе PyroSim необходимо установить трехмерную систему координат в соответствии с расположением элементов АЗС и задать соответствующие координаты для каждой точки АЗС с учетом взаимного расположения элементов. Представление модели в осях координат показано на рис. 3.

Бетонный навес размерами  $17,0 \times 14,0 \times 1,0$  м расположен на прямоугольных колоннах, имеющих длину стороны 1,0 м и высоту 5,8 м. Колонны расположены с наружной стороны на расстоянии 1 м от центра заправочных остров-

ков, имеющих размеры  $4,0 \times 0,6 \times 0,2$  м. Колонны представлены на рис. 3 в координатах (9; 7), (18; 7), (9; 13) и (18; 13).

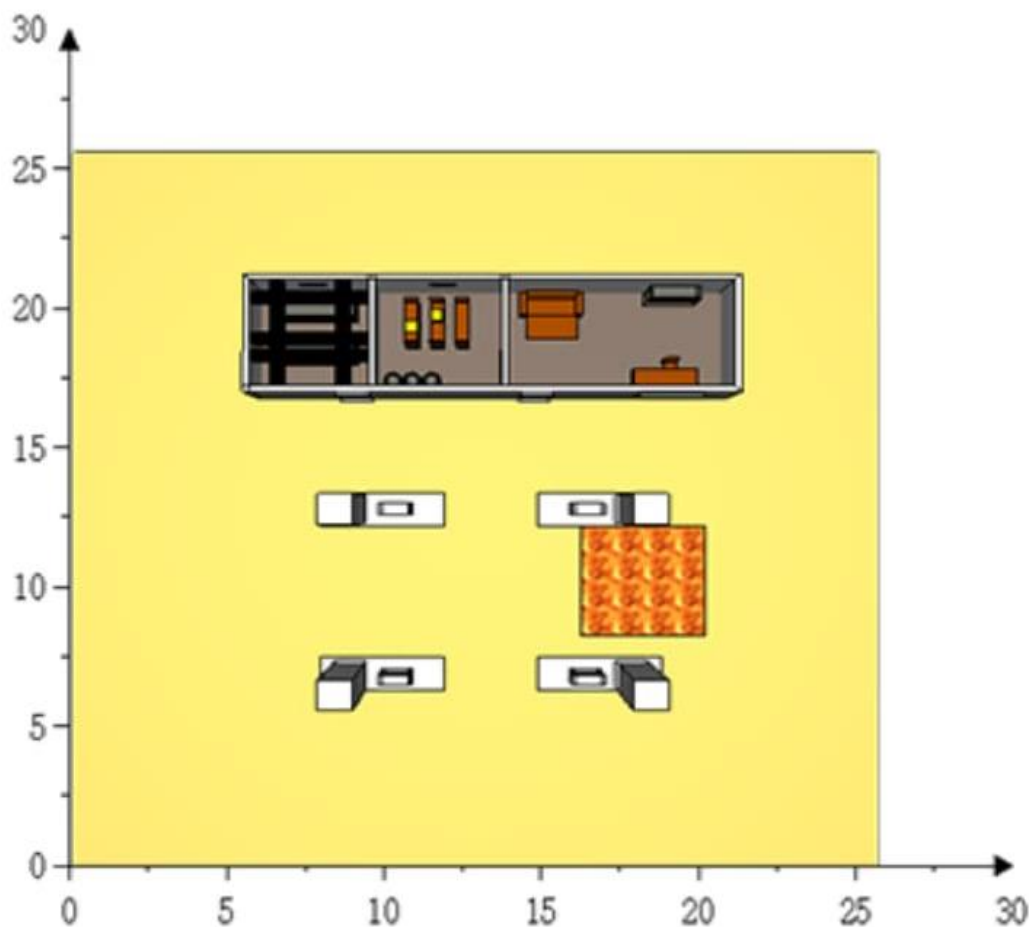


Рис. 3. Геометрическая модель объекта в программе PyroSim [11]

Каждый заправочный остров имеет топливозаправочную колонку, имеющую размеры  $0,4 \times 1,0 \times 2,0$  м. Колонки располагаются к центру на расстоянии 1,0 м от колонн заправочного острова. Заправочные колонки и колонны навеса расположены симметрично относительно центра заправочного навеса (рис. 3).

При утечке топлива на поверхность земли образуется очаг пожара; с учетом расстояний между ТРК принимаем размер очага пожара  $4 \times 4$  м.

В процессе моделирования пожара с помощью компьютерной программы PyroSim для получения результатов расположим датчики замера температуры в четырех точках модели: точки 1 и 3 расположены на расстоянии 1,0 м от двери здания АЗС; точка 2 расположена на расстоянии 0,2 м от бочки с маслом, находящейся в подсобном помещении; точка 4 расположена на расстоянии 1,0 м от

окна дежурного помещения. Все точки принимаем расположенными на высоте 1,8 м.

Устанавливаем три точки измерения видимости и высоты дымового слоя по точкам замера температуры 1, 3, 4. Плоскости замера температуры, дальности видимости и концентрации угарного газа располагаем в следующих плоскостях:  $X = 19,2$  м;  $Y = 19,2$  м;  $Z = 1,8$  м (рис. 4).

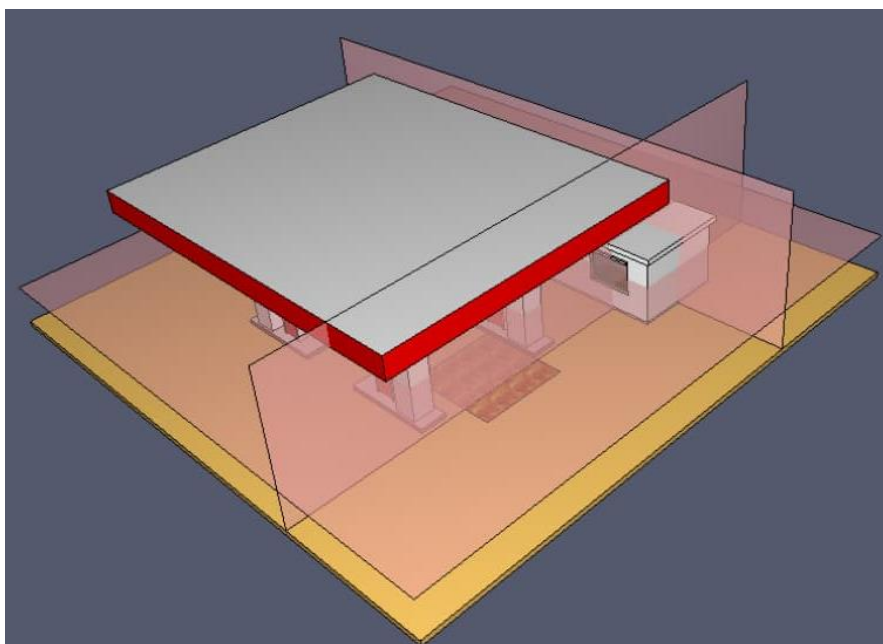


Рис. 4. Расположение плоскостей замера на условной АЗС [11]

Для численного моделирования в программе PyroSim необходимо настроить расчетную сетку. Точность сетки оказывает существенное влияние на точность результатов численного моделирования. Размер ячейки сетки определяется по формуле:

$$D^* = [Q / (\rho_\infty C_p T_\infty g^{1/2})]^{2/5}, \quad (1)$$

где  $D^*$  – характеристический диаметр пожара;  $Q$  – скорость тепловыделения, кВт;  $\rho_\infty$  – плотность окружающей среды;  $C_p$  – удельная теплоемкость при постоянном давлении;  $T_\infty$  – температура окружающей среды;  $g$  – ускорение свободного падения.

В соответствии с формулой (1) условия окружающей среды определяются для конкретной температуры окружающего воздуха: примем  $T_\infty = 20^\circ\text{C}$ . Согласно справочным данным, скорость тепловыделения бензина на единицу площади

составляет 2500 кВт, поэтому при рабочих условиях общая скорость тепловыделения поверхности зажигания составит 40 МВт.

Выполнив расчет по формуле (1) и учитывая скорость выполнения расчета, примем размер ячейки  $0,4 \times 0,4 \times 0,4$  м.

Соответственно общее количество ячеек составит 76050 штук.

Компьютерная программа PyroSim представляет картину распределения тепла, выделяемого очагом пожара, в плоскостях замеров  $Z=1,8$  м и  $Y=19,2$  м (рис. 5).

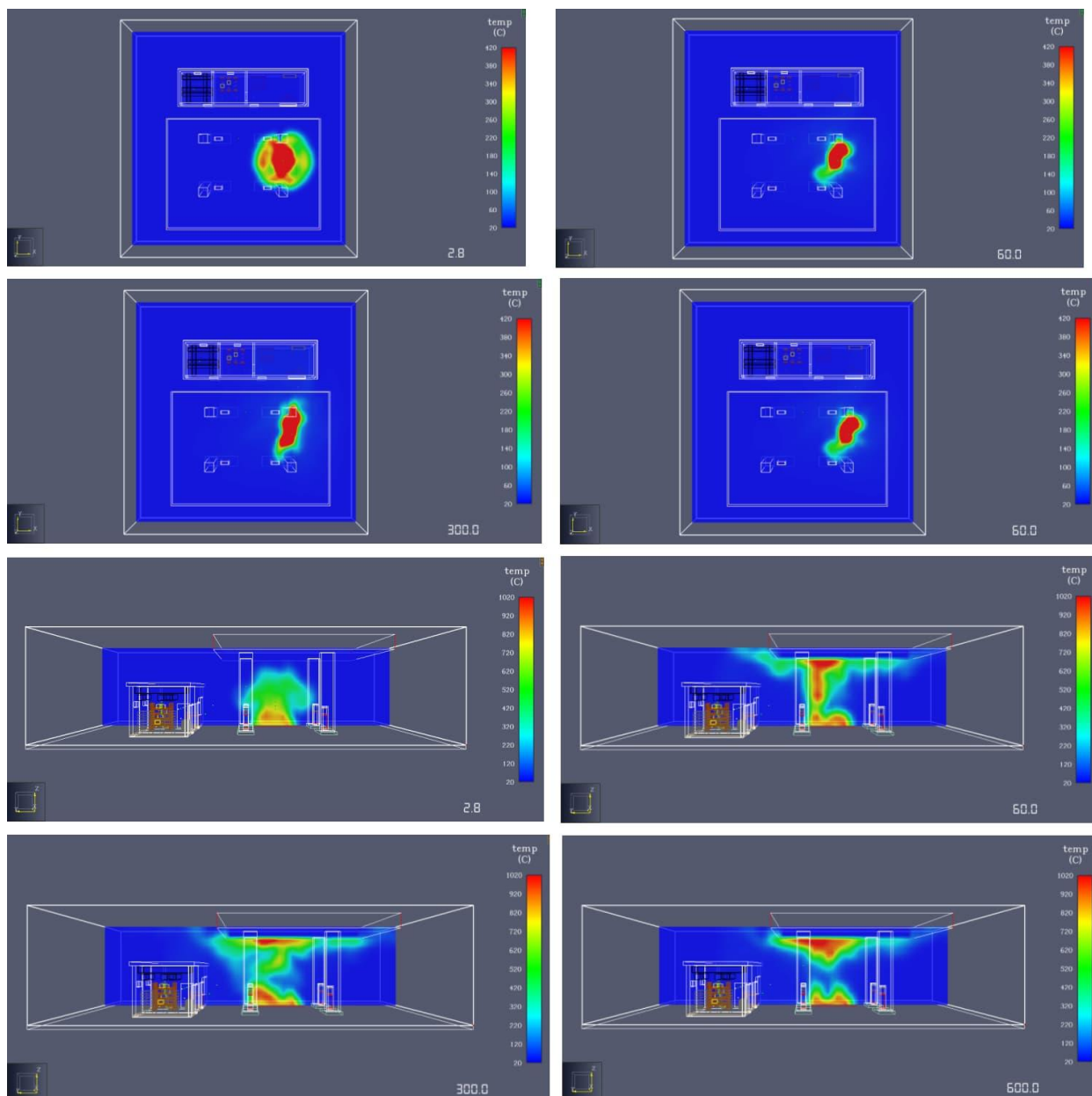


Рис. 5. Распределение тепла, выделяемого очагом пожара, в плоскостях замера [11]

Из рис. 5 видно, что тепло, выделяемое очагом пожара, способствует распространению области высокой температуры во всех направлениях:

- через 2,8 с после начала пожара область высокой температуры в плоскости  $Z = 1,8$  м достигает максимального значения;

- в это же время максимальное значение температуры в очаге пожара достигает  $1000^{\circ}\text{C}$ ;

- через 60 с после начала пожара область максимальной температуры в плоскости  $Y = 19,2$  м начинает опускаться вниз к верхней части топливозаправочной колонки;

- после этого область максимальной температуры не опускается ниже.

В процессе моделирования форма и площадь области высокой температуры постоянно изменяются, но поскольку вблизи очага пожара нет горючих материалов, пожар не распространяется за пределы очага пожара. В связи с этим область максимальной температуры не распространяется за пределы навеса АЗС к зданию АЗС.

Рассмотрим также картину распределения концентрации угарного газа. В процессе горения при пожаре на АЗС образуются твердые частицы дымовых газов, различные токсичные и вредные газы и жидкости. Токсичные и вредные газы, а также некоторые удушающие газы являются основными опасными факторами пожара, которые оказывают влияние на эвакуацию людей при пожаре на АЗС.

Угарный газ, имеющий формулу  $\text{CO}$ , является основным токсичным газом, возникающим при пожаре. Плотность угарного газа сопоставима с плотностью воздуха, и он легко смешивается с воздухом. Отравление возникает при вдыхании избыточного количества угарного газа человеком. Степень вреда угарного газа для человека в зависимости от его концентрации представлена в табл. 2.

Таблица 2

Влияние различных концентраций угарного газа на организм человека [11]

Концентрация $\text{CO}$ , промилле	Длительность воздействия	Реакция организма человека
16	8 ч	Незначительный токсический эффект



30	8 ч	Отсутствие явной физиологической реакции
50	2 ч	Отсутствие видимых последствий
100	2 ч	Головные боли и тошнота у некоторых людей
500	1 ч	Головная боль, головокружение
1000	2–3 мин	Потеря сознания, рвота
10000	2–10 мин	Причина смерти
20000	1–2 мин	Смерть

Компьютерная программа PyroSim представляет результаты моделирования концентрации угарного газа в плоскостях замера  $Z = 1,8$  м и  $Y = 19,2$  м (рис. 6).

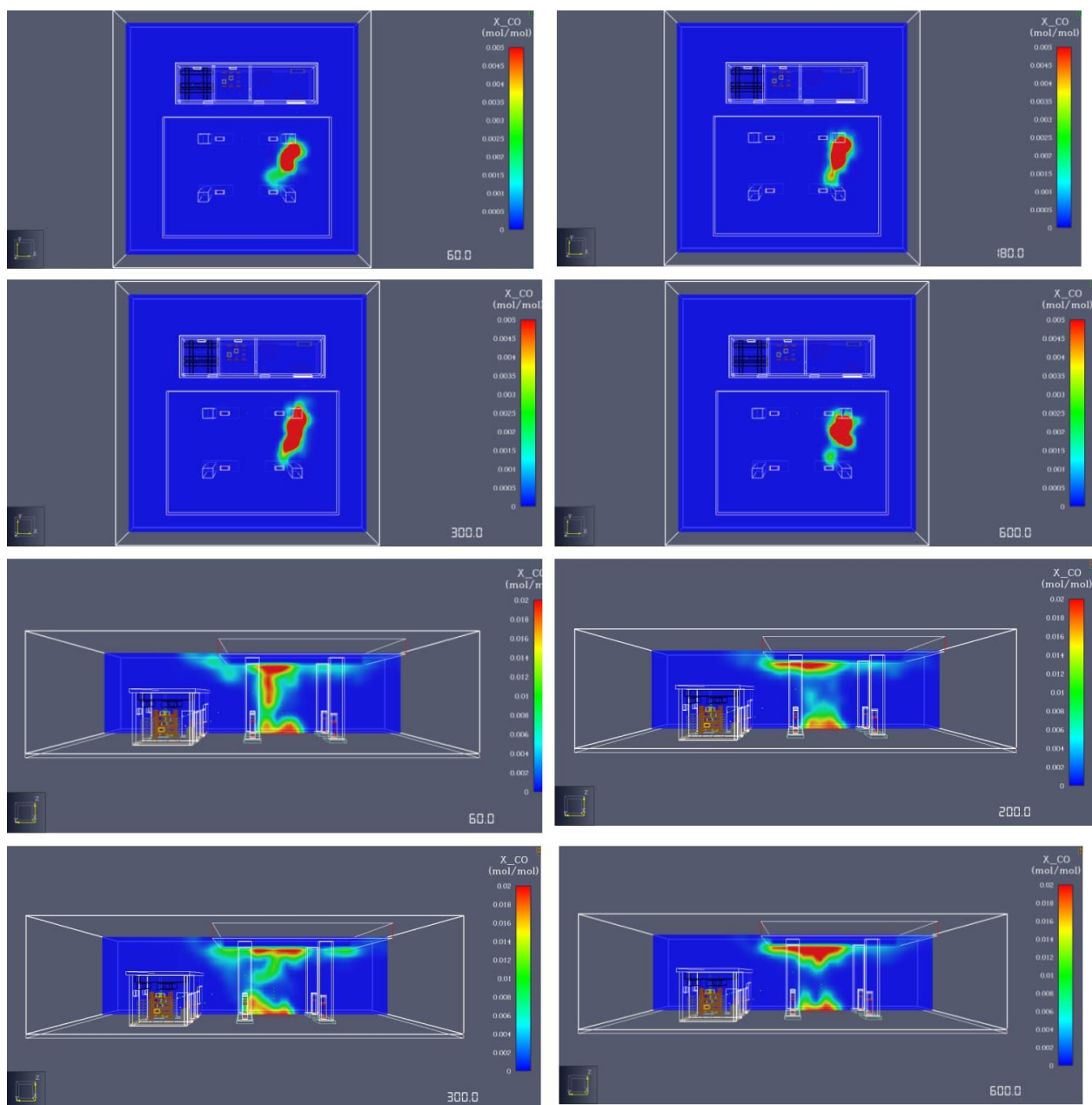


Рис. 6. Распределение концентрации угарного газа в плоскостях замера [11]



Анализ рис. 6 позволяет сделать ряд выводов:

- в очаге пожара происходит интенсивная реакция окисления. Высокий уровень потребления кислорода в очаге пожара обуславливает увеличение концентрации угарного газа в очаге пожара более 20000 промилле;
- через 60 с после начала пожара под навесом достигается максимальное значение концентрации угарного газа на уровне 15000 промилле;
- на плоскости замера  $Y = 19,2$  м видно две зоны повышенной концентрации угарного газа: непосредственно над очагом пожара и под навесом АЗС;
- за пределами центральной части очага пожара выделение угарного газа не такое интенсивное, так как горение происходит при достаточном количестве кислорода, поэтому образуется  $\text{CO}_2$ ;
- в точке 1 концентрация угарного газа достигает пикового значения 16 промилле примерно через 30 с. после начала пожара.

Согласно данным табл. 3, концентрация угарного газа на уровне 16 промилле оказывает лишь незначительный токсический эффект, существенного влияния на организм человека не происходит.

При пожаре на АЗС образуется большое количество дыма и тепла, которые распространяются в окружающую атмосферу. Моделирование в программе PyroSim позволяет увидеть картину распространения дыма на 3-й, 4-й, 300-й и 600-й секундах с момента возникновения пожара (рис. 7).

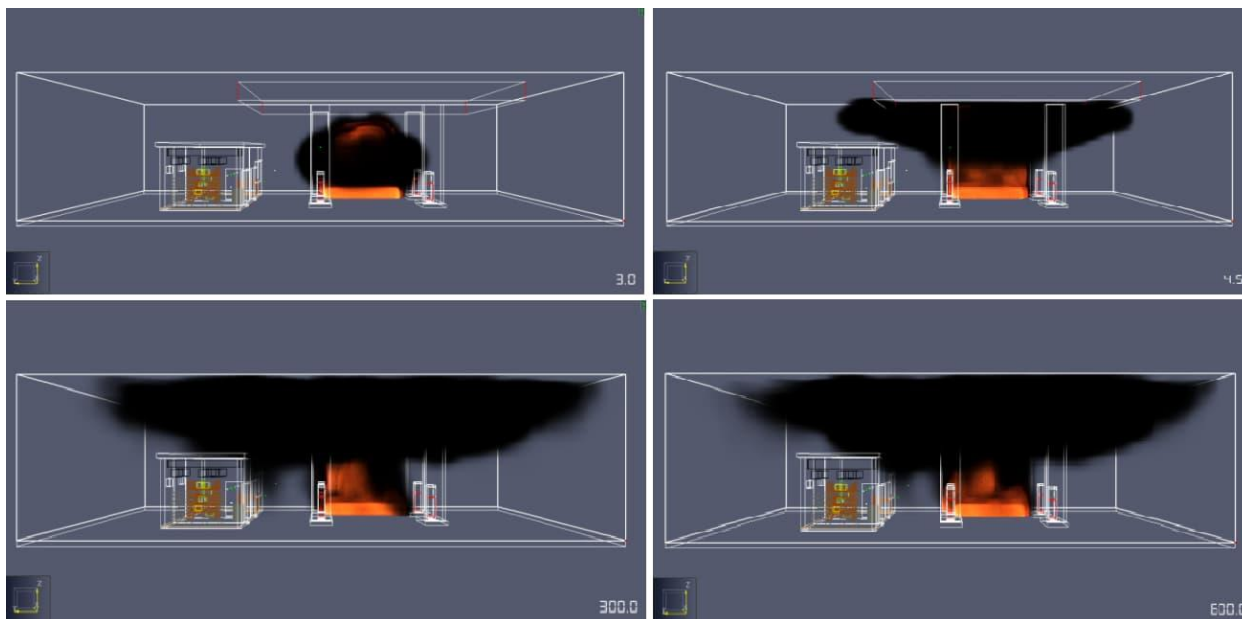


Рис. 7. Распространение дымовых потоков при пожаре на АЗС [11]

Из рис. 7 видно следующее, что через 3 с после возникновения пожара дым почти достигает навеса АЗС и начинает распространяться вокруг очага пожара; через 4,5 с после возникновения пожара дым почти выходит за пределы навеса АЗС; в это же время дымовые потоки двигаются в сторону здания АЗС. Через 300 с после начала пожара дым распространяется дальше, и часть дымовых потоков достигает двери вспомогательного офиса. На 600-й секунде пожар продолжает развиваться, но распространение дыма в моделируемой области не отличается от того, что было на 300-й секунде.

Таким образом, видно, что при возникновении пожара дымовые потоки скапливаются под навесом АЗС и на прилегающей территории. В здании АЗС дымовые потоки практически не распространяются.

В зоне горения на АЗС образуется большое количество сажи, что приводит к значительному снижению дальности видимости вблизи очага пожара. На рис. 8 показаны значения дальности видимости в плоскостях  $Z = 1,8$  м и  $Y = 19,2$  м.

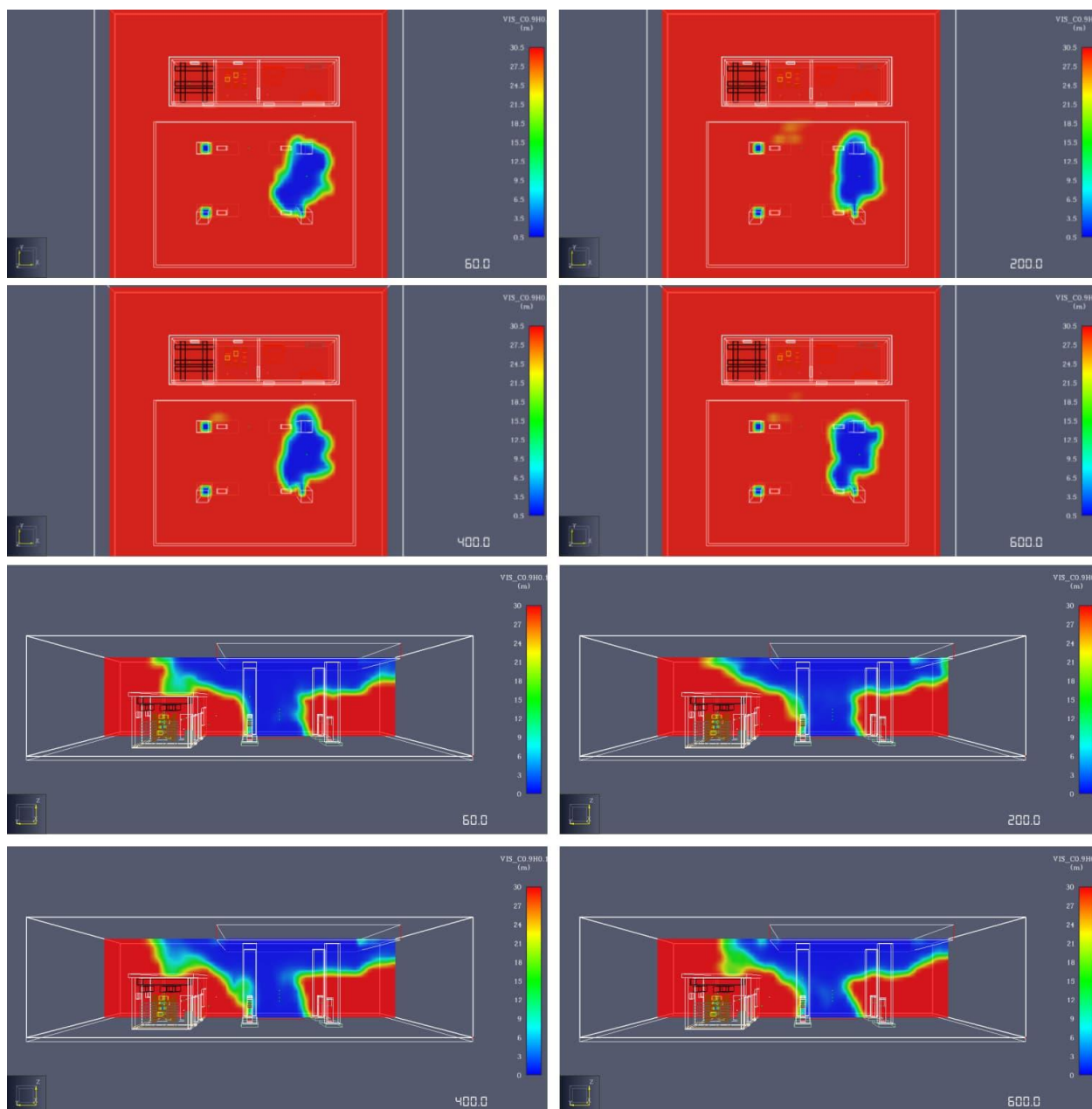


Рис. 8. Распределение дальности видимости при пожаре на АЗС  
(программа PyroSim) [11]

Анализ рис. 8 показывает, что видимость на уровне 3 м от уровня земли при пожаре на АЗС становится практически нулевой. Часть дымовых потоков распространяется рядом с подсобным помещением, что приводит к снижению дальности видимости в этой зоне. По другим помещениям здания АЗС дымовые потоки практически не распространяются, и дальность видимости внутри здания АЗС остается высокой.

В результате моделирования условного пожара на АЗС в компьютерной программе PyroSim установлено следующее.

1. При возникновении открытого пожара дым на АЗС в основном распространяется под заправочным навесом. Часть дымовых потоков распространяется в сторону здания АЗС, но дымовые потоки не попадают в помещения АЗС. Дальность видимости на расстоянии 1 м от здания АЗС остается достаточно высокой, не достигая критических значений.

2. Максимальное значение температуры в зоне горения может достигать более 1000°C. Область, где температура превышает 1000°C, располагается рядом с поверхностью горения и нижней частью топливозаправочной колонки. Температура поверхности заправочной колонки со стороны очага горения достигает 400°C.

3. Благодаря достаточному количеству кислорода в месте возникновения пожара, концентрация угарного газа на расстоянии 1 м от здания АЗС составляет менее 18 промилле – это значение не опасно и практически не причиняет вред организму большинства людей [11].

Метод численного моделирования пожара в программе PyroSim позволяет проводить углубленное изучение особенностей пожаров и разработки планов тушения пожара на автозаправочных станциях, а также может служить основой для технически обоснованного проектирования систем пожарной безопасности АЗС.

### ***Список литературы***

1. Аксенов А.А. Проблемы обеспечения пожарной безопасности на автомобильных газозаправочных станциях / А.А. Аксенов, Е.И. Аксенова, А.А. Баранов // Проблемы управления рисками в техносфере. – 2021. – №1 (57). – С. 21–26. EDN GVVUCD
2. Особенности пожарной опасности автозаправочных станций / И.О. Беликов, А.А. Зугуров, С.А. Прудников, С.В. Атрощенко // Современные тенденции развития аграрной науки: сборник научных трудов международной научно-

практической конференции / Брянский государственный аграрный университет. – Брянск, 2022. – С. 498–503. EDN JSNKBP

3. Гурбанова А.Г. Причины и последствия аварий на АЗС / А.Г. Гурбанова, Е.Г. Локтионова // Студенческий научный форум: материалы VI Международной студенческой научной конференции [Электронный ресурс]. – Режим доступа:

<https://scienceforum.ru/2014/article/2014000981?ysclid=manlmw31vr344131773>

(дата обращения 28.04.2025).

4. Гущин И.А. Обеспечение пожарной безопасности на автозаправочной станции как средство управления риском в чрезвычайной ситуации / И.А. Гущин, К.У. Морозкина // Качество и конкурентоспособность в XXI веке: материалы XIX Международной научно-практической конференции. – Чебоксары, 2021. – С. 125–133. EDN ZTNTOD

5. Емельянова В.А. Оценка безопасности функционирования автомобильной газозаправочной станции посредством анализа техногенного риска / В.А. Емельянова // Проблемы анализа риска. – 2020. – Т. 17. №2. – С. 74–85. DOI 10.32686/1812-5220-2020-17-2-74-85. EDN IXJXTS

6. Ентус А.С. Гидродинамические основы пожарной безопасности: режимы течения жидкостей / А.С. Ентус, И.В. Семенов // Вестник науки. – 2024. – Т. 2. №6 (75). – С. 1873–1877. EDN IOJJNO

7. Ивахнюк Г.К. Статистический анализ аварий на автозаправочных комплексах (станциях) / Г.К. Ивахнюк, Ю.Ю. Осмонов // Пожаровзрывобезопасность. – 2022. – Т. 31. №6. – С. 91–98. DOI 10.22227/0869-7493.2022.31.06.91-98. EDN CWLQSR

8. Калайдов А.Н. Анализ причин и следствий деструктивных событий, связанных с авариями на автозаправочных станциях / А.Н. Калайдов, Д.А. Дроздов, С.В. Шишов // Гражданская оборона на страже мира и безопасности: материалы VIII Международной научно-практической конференции, посвященной Всемирному дню гражданской обороны. – М., 2024. – С. 157–168. EDN VGEYHE

9. Козлова Е.Б. Анализ пожарной опасности эксплуатации резервуаров с нефтепродуктами на многотопливной АЗС «Уфаойл» / Е.Б. Козлова, И.А. Мелихов // Цифровая наука. – 2020. – №2–3. – С. 19–26. EDN QYNGZY

10. Медведева О.М. Проблемы обеспечения пожаровзрывобезопасности на автозаправочных станциях / О.М. Медведева, А.А. Клятченко // Транспорт России: проблемы и перспективы – 2019: материалы Международной научно-практической конференции / Институт проблем транспорта им. Н.С. Соломенко РАН. – М., 2019. – С. 159–162. EDN DQJRRO

11. Xiao Jun, Zhang Peili, Li Liheng, Li Yuxi, Wu Jingsi, Cai Yunxiong. Моделирование пожара на АЗС с использованием Pyrosim [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://firefinder.ru/statyi/modelirovanie-pozhara-na-azs-s-ispolzovaniem-pyrosim/> (дата обращения: 18.06.2025).

12. Свирепова М.С. Анализ проблем безопасности на автогазозаправочных станциях / М.С. Свирепова, Н.К. Плуготаренко // Защита окружающей среды в нефтегазовом комплексе. – 2019. – №1 (286). – С. 10–14. DOI 10.33285/2411-7013-2019-1(286)-10-14. EDN VRCQQM

13. Семенов И.В. Пожарная тактика в системе обеспечения безопасности государства и общества / И.В. Семенов, В.В. Добрянский // Научный дебют – 2024: сборник статей II Международного научно-исследовательского конкурса. – Петрозаводск, 2024. – С. 67–71. DOI 10.46916/22052024-978-5-00215-398-5. EDN KYBZWG

14. Семенов И.В. К проблеме обеспечения пожарной безопасности на территории ПСЧ / И.В. Семенов, Е.Ю. Макаров // Наука, образование, общество: тенденции и перспективы развития: материалы II Всероссийской научно-практической конференции. – Чебоксары, 2024. – С. 16–20. DOI 10.21661/r-562927. EDN BQNSNW

15. Семенов И.В. Особенности экспертиз при расследовании пожаров, сопряженных с взрывом транспортных средств / И.В. Семенов, В.Е. Прокофьев // Стратегические ориентиры развития науки и образования: материалы Всерос-

сийской научно-практической конференции с международным участием. – Чебоксары, 2025. – С. 169–174. DOI 10.21661/r-575117. EDN DLDGPI

16. Ухаткин А.С. Анализ и количественная оценка пожаробезопасности на автозаправочных станциях / А.С. Ухаткин // Энергия молодежи для нефтегазовой индустрии: сборник материалов V Международной научно-практической конференции молодых ученых. – Альметьевск, 2020. – С. 777–783. EDN XOKKSW

17. Фомин А.В. Анализ статистики пожаров на автомобильных газозаправочных станциях в России / А.В. Фомин, Ф.Ф. Шахманов, С.А. Нефедьев // Проблемы управления рисками в техносфере. – 2016. – №4 (40). – С. 87–91. EDN VHWAXN