

УДК 004.942:614.841

prytkov.l.n@mail.ru

**МОДЕЛИРОВАНИЕ ПОЖАРА В ТИПОВОМ МАШИННОМ ЗАЛЕ АТОМНОЙ
ЭЛЕКТРОСТАНЦИИ ДЛЯ ОЦЕНКИ ЭФФЕКТИВНОСТИ ВНЕДРЕНИЯ
РОБОТИЗИРОВАННЫХ УСТАНОВОК ПОЖАРОТУШЕНИЯ****SIMULATION OF A FIRE IN A TYPICAL ENGINEERING ROOM
OF A NUCLEAR POWER PLANT FOR ESTIMATION OF THE EFFICIENCY
OF IMPLEMENTATION OF ROBOTIC FIRE EXTINGUISHING INSTALLATIONS**

*Прытков Л. Н., Барбин Н. М., доктор технических наук, доцент,
Кобелев А. М., кандидат технических наук,
Титов С. А., Гришина Е. В., кандидат педагогических наук, доцент
Уральский институт ГПС МЧС России, Екатеринбург*

*Prytkov L., Barbin N., Kobelev A., Titov S., Grishina E.,
Ural Institute of State Firefighting Service of Ministry
of Russian Federation for Civil Defense, Yekaterinburg*

В статье рассмотрены основные источники возникновения пожаров в машинных залах, особенности проведения боевых действий по тушению пожаров, смоделирована аварийная ситуация, связанная с утечкой турбинного масла с последующим возгоранием на оси обслуживания турбины без утечки на нижележащие уровни. Изложены результаты моделирования пожара в типовом машинном зале атомной электростанции до и после внедрения роботизированных установок пожаротушения.

Ключевые слова: моделирование пожара, роботизированная установка пожаротушения, полевая модель пожара, пожары в машинных залах, атомная электростанция, электростанция.

The article discusses the main sources of fires in the turbine rooms, the features of the conduct of hostilities to extinguish fires, an emergency situation associated with the leakage of turbine oil with subsequent ignition on the axis of the turbine service without leakage to the lower levels is modeled. robotic fire extinguishing installation The results of modeling a fire in a typical turbine room of a nuclear power plant before and after the introduction of robotic fire extinguishing installations are presented.

Keywords: modeling of fires, robotic fire extinguishing system, field model of fire, fires in machine rooms, nuclear power plant, electrical power station.

Машинные залы атомных и тепловых электростанций являются технически сложными объектами, что обусловлено большим количеством маслonaполненного оборудования, насосов, предназначенных для питания турбины, а также вспомогательных систем, необходимых для функционирования пароводяного контура электростанции.

Основными источниками пожара являются:

- кабельные линии;
- большое количество масла, находящегося в системе маслохозяйства турбоустановки;
- водород, применяемый для охлаждения генератора [1].

С точки зрения обеспечения пожарной безопасности и проведения боевых действий по тушению пожаров, машинные залы имеют особенности, усложняющие

действия пожарных подразделений при работе на данных объектах. Основными из них являются:

- наличие электроустановок под напряжением, отключение которых невозможно без привлечения обслуживающего персонала станции, так как имеется большое количество оборудования, для полного обесточивания которого необходимо иметь специальные знания в данной области;

- последствия после разрушения турбины;

- угроза обрушения металлических ферм покрытия машинного зала ввиду быстрого прогрева;

- необходимость в кратчайшие сроки осуществлять охлаждение металлоконструкций, что требует задействовать большое количество сил и средств;

- вероятность взрыва водорода из системы охлаждения турбогенератора;

- огромное количество токсичных продуктов при горении турбинного масла, ведение боевых действий по тушению в условиях сильного задымления и интенсивного теплового излучения [2].

Пожары в машинных залах приводят к наиболее тяжелым последствиям при разрушении турбины, выброса большого количества масла с последующим возгоранием, горение водорода из систем охлаждения. Горение в замкнутом объеме сопровождается сильным выделением токсичных продуктов, снижением видимости, при этом огромный запас воздуха и отсутствие преград способствует распространению пожара. По результатам натурных экспериментов, горение в машинном зале объемом 8000 м^3 турбинного масла на площади 5 м^2 в течение 5 мин снижает видимость до 1 м [3].

Утечка смазочного масла возможна при разрушении или ослаблении соединений трубопроводов маслосистемы турбины. Объем вышедшего под давлением масла и площади горючей жидкости зависит от инерционности системы аварийного

сброса масла. Возгорание возможно при попадании на раскаленные части турбины.

Для ликвидации горения масла, вытекающего из поврежденных маслопроводов или системы смазки турбины в виде струи и растекающегося по оборудованию на нулевую отметку, используют распыленные струи воды и пену средней кратности [4].

Результаты исследования поведения металлоконструкций при пожаре, представленные в работе [5], показывают, что нагрев ферм свыше $500 \text{ }^\circ\text{C}$ приводит к потере прочности с последующим обрушением. Необходимо подать большой объем огнетушащего состава на тушение, при этом оперативно осуществить охлаждение ферм для предотвращения обрушения. Для выполнения данных задач целесообразным будет применение роботизированных установок пожаротушения.

Активное применение пожарных роботов началось в 2000-х гг. Они обеспечивают оперативное обнаружение и тушение пожара. Пожарные роботы нашли применение во многих областях промышленности и уже внедрены в разных городах для защиты спортивно-зрелищных комплексов, производственных цехов деревообработки, нефтяной промышленности, а также ангаров для самолетов [6]. Согласно [7] роботизированная установка пожаротушения (РУП) включает в себя два и более пожарных робота, систему определения координат, а также устройство программного управления комплексом. В состав РУП входит два и более пожарных робота, устройства управления с дисплеем, которое соединено с пожарным роботом по интерфейсу RS-485, инфракрасный извещатель наведения на очаг пожара, запорно-пусковые устройства с электроприводом, блок питания, контроллер уровня пенообразователя и уровня жидкости, баки хранения пенообразователя, электромагнитные клапаны [7].

Целью моделирования является получение информации о температуре на

уровне металлических конструкций покрытия при использовании роботизированных установок пожаротушения и без них.

В работе проведен выбор расчетной модели; выполнено построение топологии типового машинного зала атомной электростанции; проведен анализ возможных аварий и их последствий; заданы свойства горючей нагрузки в программе PiroSim; проведено моделирование развития пожара и его опасных факторов; проанализированы полученные результаты изменения температуры прогрева металлических ферм покрытия с учетом применения роботизированного комплекса пожаротушения и без его применения; проведена оценка эффективности предлагаемого решения.

Моделирование развития пожара производилось при помощи графического пользовательского интерфейса PiroSim для программы FDS (Fire Dynamic Simulator), которая предназначена для моделирования сценариев пожара при помощи вычислительной гидродинамики, оптимизированной для низкоскоростных температурно-зависимых потоков [8]. Данная программа применяется для обеспечения безопасности зданий на стадии проектирования, для определения безопасности уже построенных зданий, при реконструкции, а также при расследовании пожаров. FDS является мощным инструментом для моделирования пожара, разработанным Национальным институтом стандартов и технологий (National Institute of Standards and Technology – NIST). С помощью FDS можно моделировать различные пожары, например, горение в печи или пожар нефтяного фонтана.

Программа FDS применяется не только для моделирования опасных факторов пожара, но и для проектирования си-

стемы вентиляции в здании, а также моделирования активации сприклерных оросителей и пожарных извещателей различного типа [8].

Исходные данные

В рамках моделирования рассматривается авария трубопровода высокого давления, в котором находится турбинное масло, предназначенное для смазки турбины. В следствие разгерметизации произошел розлив масла на площади 144 м² на оси обслуживания турбоагрегата. При взаимодействии с раскаленными частями турбины, произошло возгорание. Рассматриваемая авария будет сопровождаться резким повышением температуры вблизи очага возгорания, большим выделением токсичных продуктов горения, снижением видимости и интенсивным воздействием теплового потока, в первую очередь, на металлические фермы и технологическое оборудование. При данном развитии аварии является целесообразным осуществить тушение пожарными роботами с единой системой программного управления, которые объединены в роботизированный пожарный комплекс, использующий для обнаружения пожара инфракрасные датчики, установленные на стволах [9, 10]. Инерционность срабатывания роботизированной установки пожаротушения составляет 60 сек. Существенным преимуществом использования роботизированных установок является возможность их программирования для определенных задач, например, осуществление тушения очага пожара или защита металлических конструкций ферм покрытия без участия человека, а также переход в режим управления оператором для наведения ствола самостоятельно. Характеристики турбинного масла взяты из базы данных Ю. А. Кошмарова [11] и приведены в табл. 1.

Таблица 1
Характеристики турбинного масла

Характеристика	Величина	Единица измерения
Низшая теплота сгорания	41,9	МДж/кг
Дымообразующая способность	243	Нп м ² /кг
Удельный расход кислорода	-0,282	кг/кг
Удельная скорость выгорания	0,03	кг/м ² ·с
Удельный выход диоксида углерода, CO ₂	0,7	кг/кг
Удельный выход монооксида углерода, CO	0,122	кг/кг
Удельный выход хлороводорода, HCl	0	кг/кг

В расчетной модели типового машинного зала АЭС приняты следующие параметры:

- турбина К 800-130/3000;
- турбогенератор ТЗВ-890-2УЗ мощностью 890 МВт, напряжением 24 000 В;

– количество турбогенераторов – 1.

Машинный зал имеет пролет 45 м и длину 108 м, выполнен со сквозным железнодорожным проездом. Расположение турбогенератора в машинном зале продольное (рис. 1) [12].

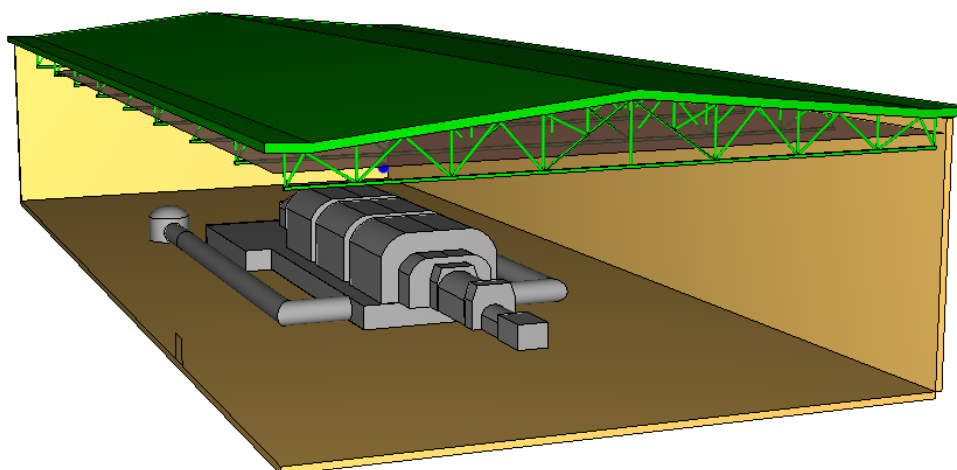


Рисунок 1. Модель машинного зала

В расчетной модели не учитывается деаэрационная этажерка, так как находящееся там оборудование не оказывает существенного влияния на распространение пожара и его опасных факторов. В рамках моделирования рассматривается сценарий, при котором разлив турбинного масла произошел на оси обслуживания турбоагрегата без утечки на нижележащие уровни машинного зала. Таким образом уменьшилось количество ячеек в расчетных сетках, что позволило уменьшить количество машинного времени, необходимого для моделирования распространения пожара.

При моделировании было построено семь расчетных сеток. Расположение сеток представлено на рис. 2. Наиболее мелкие ячейки расположены ближе к источнику пожара, чем дальше от очага, тем ячейки более крупные. Это позволило произвести более точный расчет и снизить нагрузку на компьютер при моделировании. Характеристики расчетных сеток приведены в табл. 2.

Таблица 2
Характеристики расчетных сеток

Наименование сетки	Геометрические размеры сетки, м	Размер ячейки сетки, м	Количество ячеек в сетке
Машзал1	11 × 11 × 20	0,5 × 0,5 × 0,5	19 360
Машзал2	9 × 45 × 20	1 × 1 × 1	8 100
Машзал3	11 × 17 × 20	1 × 1 × 1	3 740
Машзал4	11 × 17 × 20	1 × 1 × 1	3 740
Машзал5	26 × 45 × 20	1 × 1 × 1	23 400
Машзал6	46 × 21 × 20	1 × 1 × 1	18 400
Машзал7	46 × 42 × 20	2 × 2 × 2	9 660

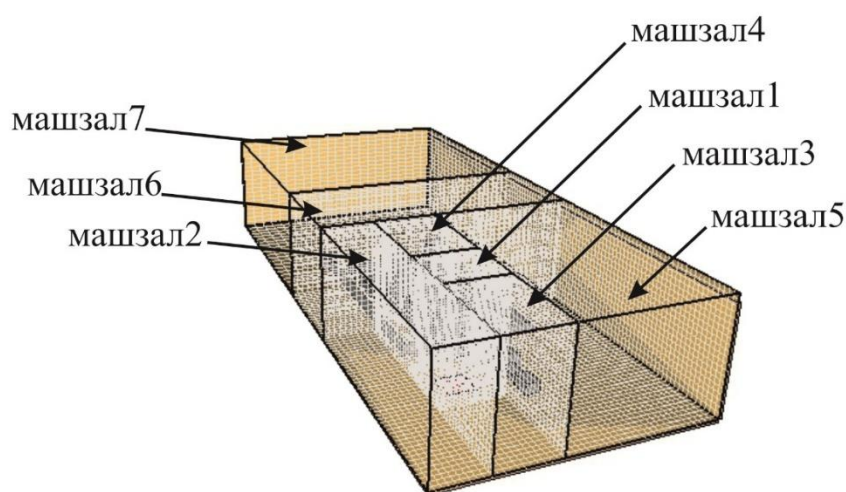


Рисунок 2. Расположение расчетных сеток

Для определения температуры на уровне металлических ферм установлены датчики температуры газовой среды. На каждой ферме расположено два датчика, сверху и снизу. Нумерация датчиков имеет следующий вид: $Na-bc$, где N – вариант моделирования (1 – с использованием роботизированного комплекса пожаротушения, 2 – без его использования), a – индекс, обозначающий расположение датчика на

ферме (v – сверху, n – снизу), b – номер пояса ферм, c – индекс, обозначающий порядковый номер датчика на ферме.

К примеру, датчик $2v-34$ означает, что рассматривается вариант моделирования без применения роботизированного комплекса, датчик расположен четвертым на верхней ферме третьего пояса. Расположение датчиков температуры представлено на рис. 3.

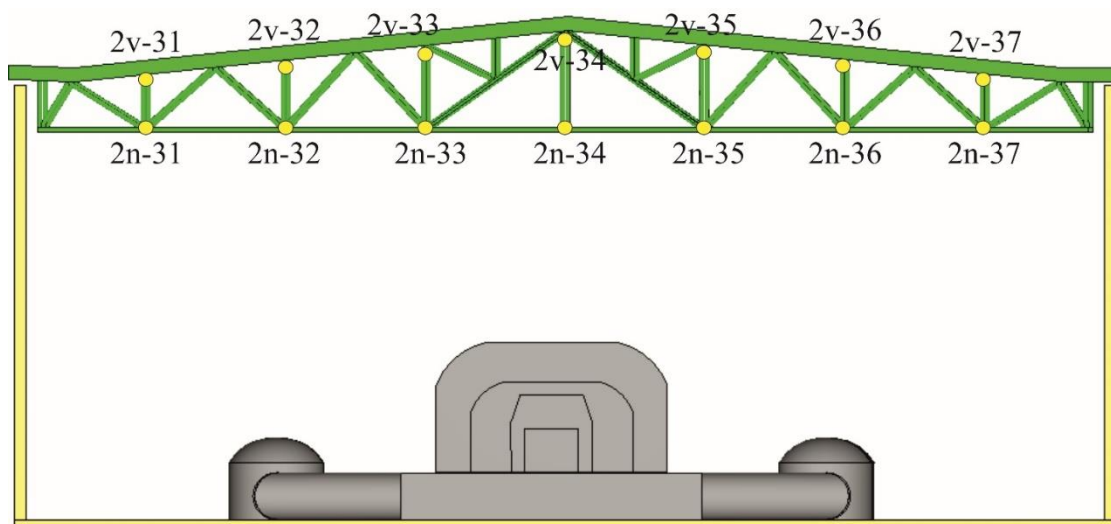


Рисунок 3. Расположение датчиков вдоль ферм

Для проведения расчетов применялся компьютер со следующими характеристиками:

- процессор – Intel Core i5 10400F 2.9 ГГц;
- оперативная память (RAM) 8 Гб;
- графический контроллер GeForce GTX 1650;

– объем видеопамяти 4 Гб.

При использовании данного компьютера моделирование 5 минут горения заняло 12 часов машинного времени. Для наглядности результатов моделирования, применялись 3D-сечения температуры в модели, представленные на рис. 4–8.

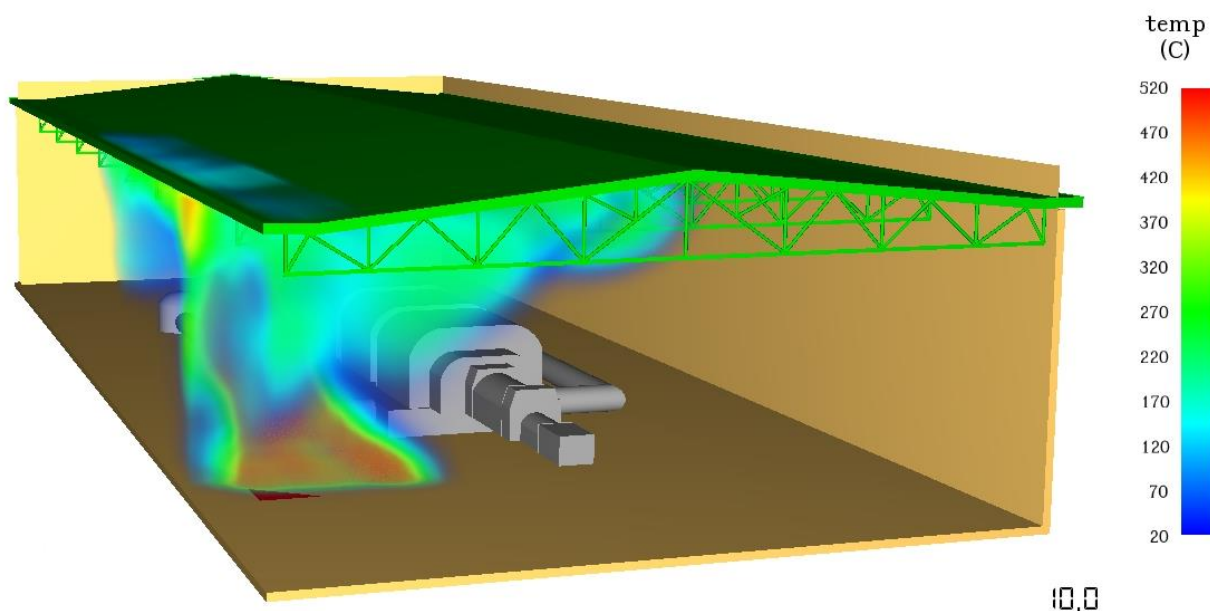


Рисунок 4. Температура в машинном зале на 10 секунде горения

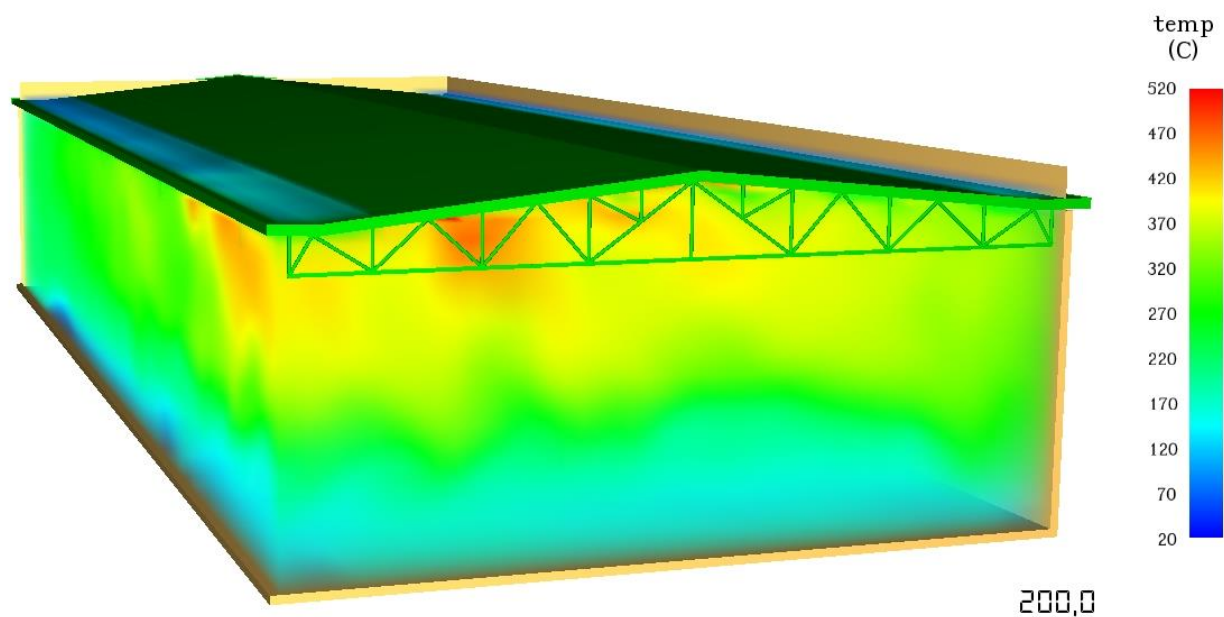


Рисунок 5. Температура в машинном зале на 200 секунде горения без применения роботизированного пожарного комплекса

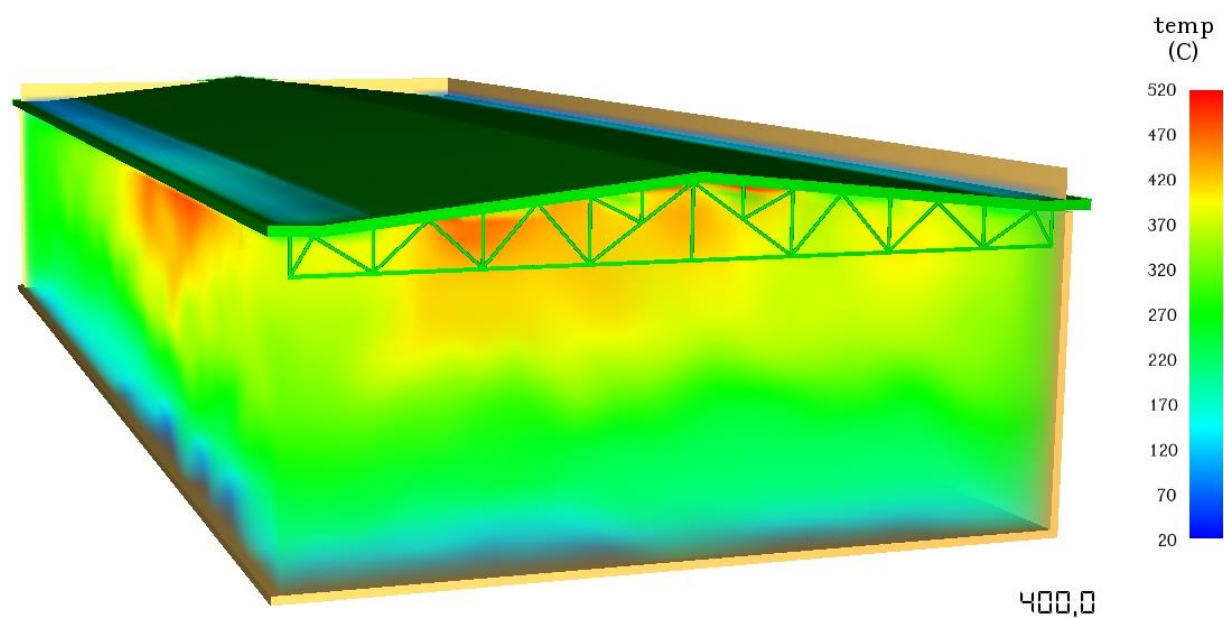


Рисунок 6. Температура в машинном зале на 400 секунде горения без применения роботизированного пожарного комплекса

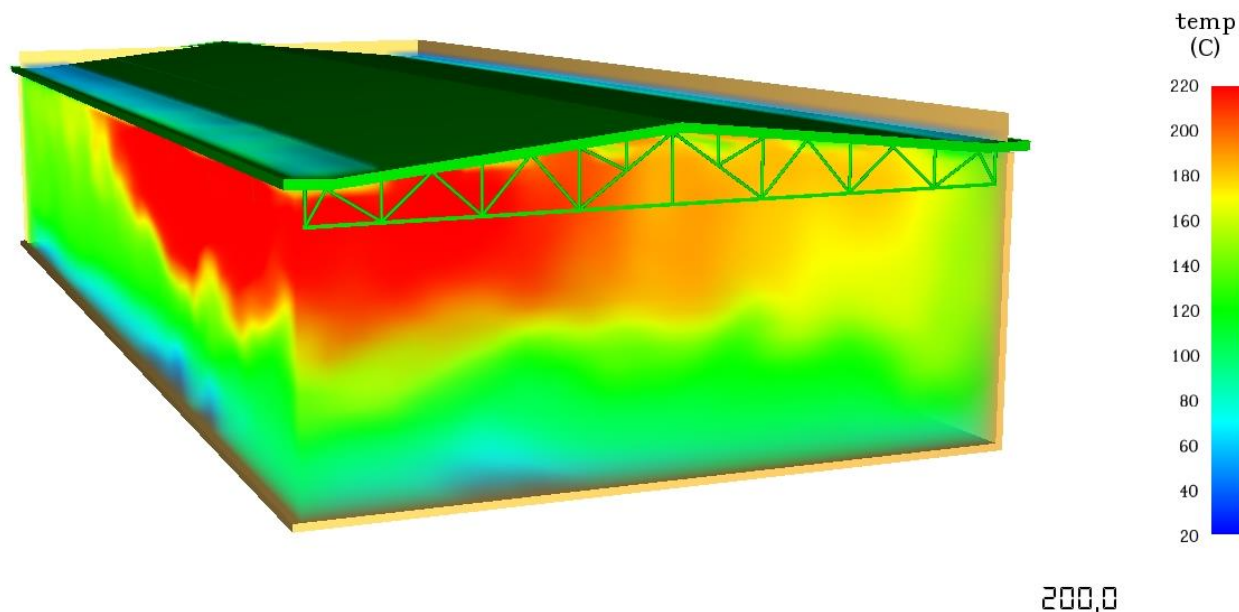


Рисунок 7. Температура в машинном зале на 200 секунде горения при применении роботизированного пожарного комплекса

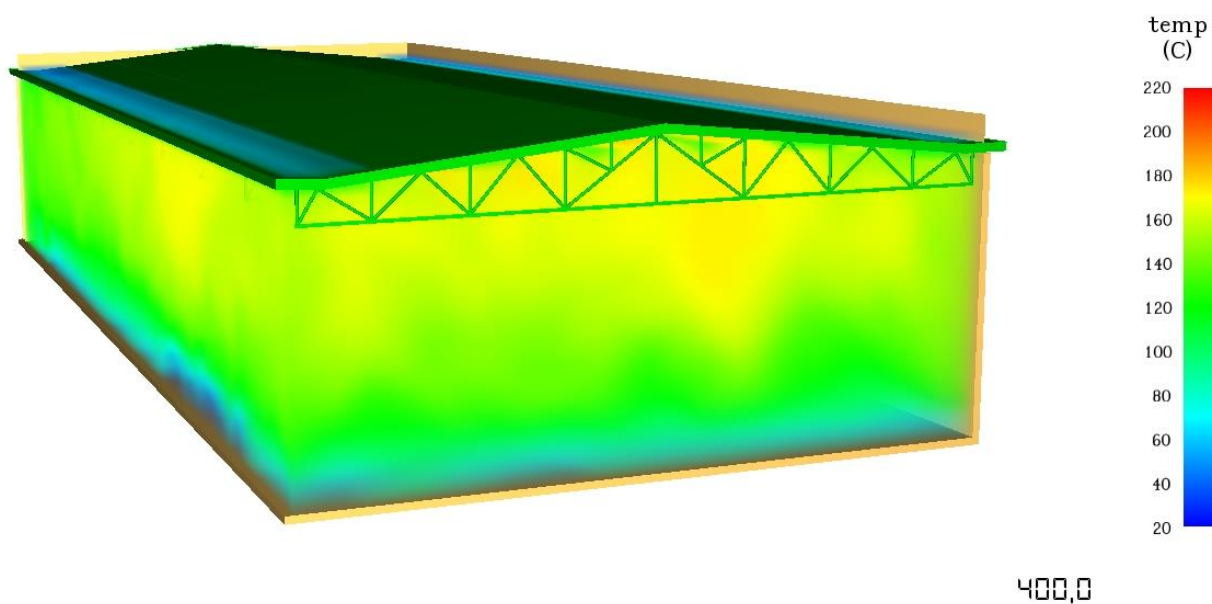


Рисунок 8. Температура в машинном зале на 400 секунде горения при применении роботизированного пожарного комплекса

Результаты моделирования

В рамках одной публикации, ввиду большого объема полученных данных, не представляется возможным представить полные результаты моделирования. Наиболее целесообразным является представление полученных результатов от датчиков температуры, которые расположены непосредственно над очагом пожара, а

именно, на третьем поясе ферм. Полученные результаты представлены на рис. 9–10.

Следует отметить, что в случае применения роботизированного пожарного комплекса, на уровне нижней части фермы наблюдается существенное снижение температуры, порядка 200–300 °С. Резкое увеличение температуры на начальной стадии моделирования связано с возгоранием турбинного масла на большой площади, над

очагом горения возникают конвективные потоки продуктов горения и нагретого воздуха, увеличивается интенсивность газообмена, мощность теплового потока увеличивается, что приводит к значительной циркуляции массы газов в помещении. При достижении горячих потоков покрытия происходит его обогрев за счет теплопередачи, продукты горения остывают и опускаются вниз. Непрерывная циркуляция приводит к

повышению среднеобъемной температуры в машинном зале. При применении роботизированного пожарного комплекса наблюдается уменьшение среднеобъемной температуры в помещении. Интенсивность горения значительно снижается, что приводит к меньшему значению теплового потока и излучения пламени, а также увеличению времени прогрева строительных конструкций.

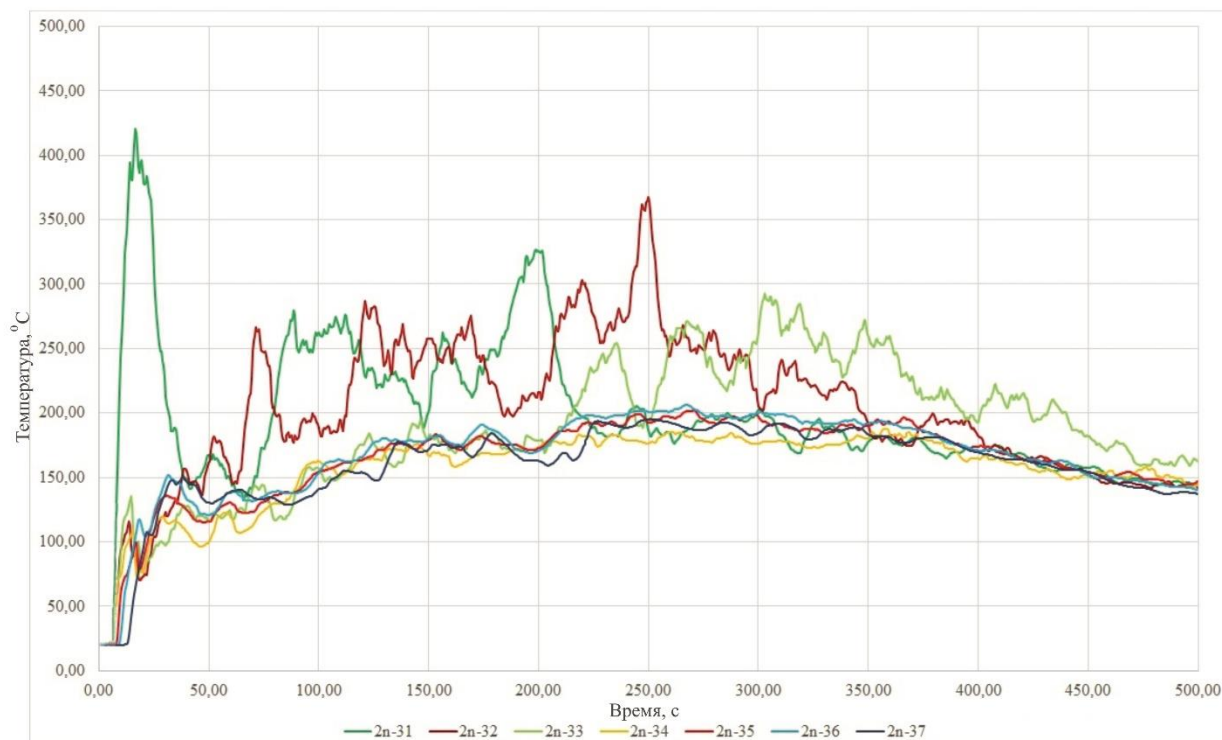


Рисунок 9. Температура в нижней части фермы.
Вариант с применением роботизированного пожарного комплекса

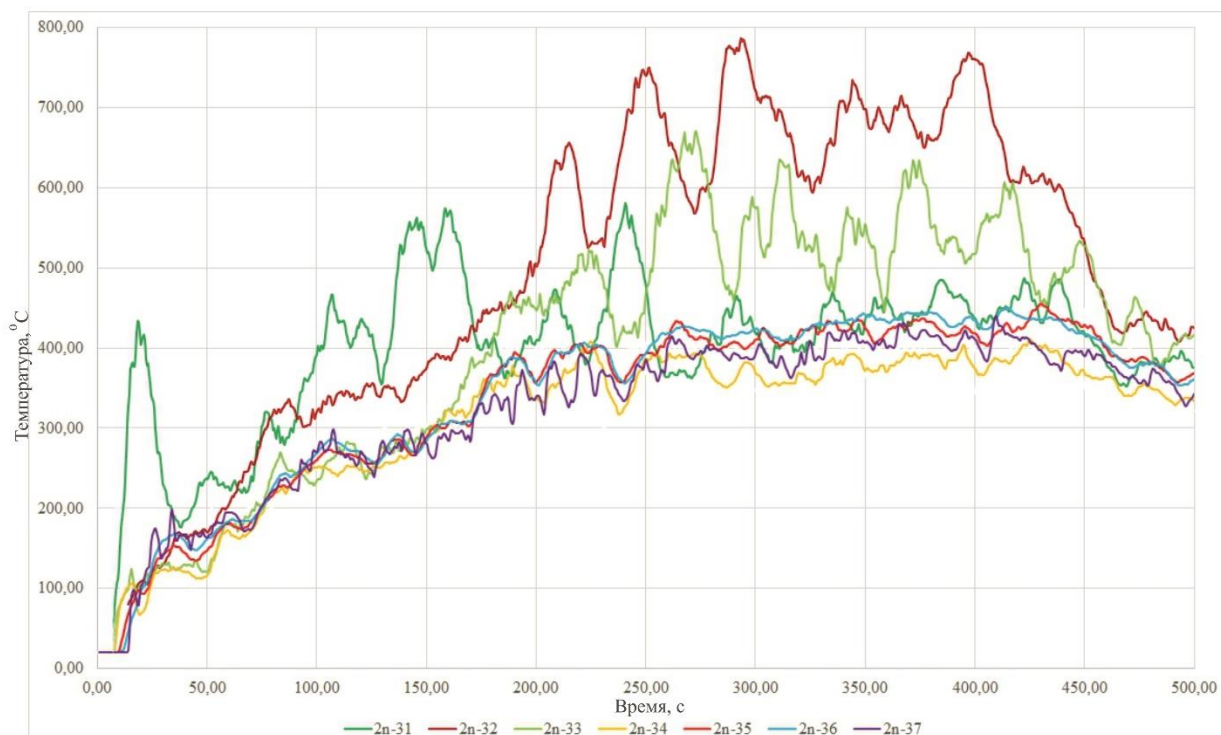


Рисунок 10. Температура в нижней части фермы.
Вариант без применения роботизированного пожарного комплекса

Выводы. Проведенный анализ пожаров в машинных залах, при которых горючей нагрузкой является турбинное масло, позволяет сделать вывод, что первоочередной задачей является охлаждение металлических конструкций крыши. В рамках данной статьи рассмотрен сценарий, при котором в кратчайшие сроки осуществляется подача огнетушащего вещества, при помощи роботизированного пожарного комплекса с инфракрасными датчиками для обнаружения и наведения стволов на очаг пожара. Результаты проведенного моделирования подтвердили эффективность применения роботизированных

установок пожаротушения, использующих для обнаружения пожара инфракрасные датчики, что позволяет в кратчайшие сроки осуществить подачу огнетушащего вещества в автоматическом режиме без участия человека.

Применение роботизированного комплекса пожаротушения в совокупности с мероприятиями по огнезащитной обработке, а также устройством люков в покрытии машинного зала для снижения тепловой нагрузки [12], позволит повысить время достижения металлическими фермами критических температур и предотвратить их обрушение.

Литература

1. Кириллов Г. Н. и др. Атомные станции: обеспечение пожарной безопасности, вопросы контроля и надзора. М., 2012. 100 с.
2. Рекомендации по планированию, организации и ведению боевых действий подразделениями ГПС при тушении пожаров на АЭС в условиях радиационной аварии. М., 2002. 68 с.
3. Микеев А. К. Противопожарная защита АЭС. М., 1990. 432 с.
4. Пожарная тактика: основы тушения пожаров / В. В. Тербенев, А. В. Подгрушный. М., 2012. 322 с.
5. Страхов В. Л., Давыдкин Н. Ф., Каледин В. О. Особенности поведения при пожаре и расчет огнестойкости несущих строительных конструкций // Пожарная безопасность в строительстве. 2011. № 2. С. 20–29.

6. Защита пространственных металлических конструкций машинных залов энергетических объектов от воздействия высоких температур в условиях пожара / В. И. Томаков и др. // Известия Юго-Западного государственного университета. Серия: Техника и технологии. 2018. Т. 8, № 1 (26). С. 67–80.
7. ГОСТ Р 53326–2009 Техника пожарная. Установки пожаротушения роботизированные. Общие технические требования. Методы испытаний.
8. Fire Dynamics Simulator. Technical Reference Guide. Vol. 1: Mathematical Model / NIST Special Publication 1018-1. Sixth Edition. 2015.
9. Горбань Ю. И. Пожарные роботы в современных технологиях автоматического пожаротушения // Алгоритм безопасности. 2010. № 3. С. 66–71.
10. Горбань Ю. И., Синельникова Е. А. Системы пожаротушения для защиты машинных залов ТЭЦ, АЭС и ГЭС: Проблемы и решения // Алгоритм безопасности. 2011. № 3. С. 32–36.
11. Кошмаров Ю. А. Прогнозирование опасных факторов пожара в помещении. М., 2000. 118 с.
12. Атомные электростанции с реакторами на быстрых нейтронах с натриевым теплоносителем. Ч. 1 / А. И. Бельтюков и др. ; под общ. ред. С. Е. Щеклеина, О. Л. Ташлыкова. Екатеринбург, 2013. 548 с.
13. Акулов А. Ю., Сатюков Р. С., Субачев С. В., Субачева А. А. Моделирование пожара в машинном зале электростанции для оценки мероприятий по повышению огнестойкости его покрытия // Технологии техносферной безопасности. 2015. № 2 (60). С. 38–48. URL: <http://ipb.mos.ru/ttb>.

References

1. Kirillov G. N. et al. Atomnye stancii: obespechenie pozharnoj bezopasnosti, voprosy kontrolya i nadzora. М., 2012. 100 p.
2. Rekomendacii po planirovaniyu, organizacii i vedeniyu boevyh dejstvij podrazdeleniyami GPS pri tushenii pozharov na AES v usloviyah radiacionnoj avarii. М., 2002. 68 p.
3. Mikeev A. K. Protivopozharnaya zashchita AES. М., 1990. 432 p.
4. Pozharnaya taktika: Osnovy tusheniya pozharov / V. V. Terebnev, A. V. Podgrushnyj. М., 2012. 322 p.
5. Strahov V. L., Davydkin N. F., Kaledin V. O. Osobennosti povedeniya pri pozhare i raschet ognestojkosti nesushchih stroitel'nyh konstrukcij // Pozharnaya bezopasnost' v stroitel'stve. 2011. № 2. P. 20–29.
6. Zashchita prostranstvennyh metallicheskih konstrukcij mashinnyh zalov energeticheskikh ob"ektov ot vozdejstviya vysokih temperatur v usloviyah pozhara / V. I. Tomakov et al. // Izvestiya YUgo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Tekhnika i tekhnologii. 2018. Т. 8, № 1 (26). P. 67–80.
7. GOST R 53326–2009 Tekhnika pozharnaya. Ustanovki pozharotusheniya robotizirovannye. Obshchie tekhnicheskie trebovaniya. Metody ispytaniy.
8. Fire Dynamics Simulator. Technical Reference Guide. Vol. 1: Mathematical Model / NIST Special Publication 1018-1. Sixth Edition. 2015.
9. Gorban' YU. I. Pozharnye roboty v sovremennyh tekhnologiyah avtomaticheskogo pozharotusheniya // Algoritm bezopasnosti. 2010. № 3. P. 66–71.
10. Gorban' YU. I., Sinel'nikova E. A. Sistemy pozharotusheniya dlya zashchity mashinnyh zalov TEC, AES i GES: Problemy i resheniya // Algoritm bezopasnosti. 2011. № 3. P. 32–36.
11. Koshmarov YU. A. Prognozirovanie opasnyh faktorov pozhara v pomeshchenii. М., 2000. 118 p.
12. Atomnye elektrostancii s reaktorami na bystryh nejtronah s natrievym teplonositelem. Ch. 1 / A. I. Bel'tyukov et al; pod obshch. red. S. E. SHCHekleina, O. L. Tashlykova. Ekaterinburg, 2013. 548 p.
13. Akulov A. YU., Satyukov R. S., Subachev S. V., Subacheva A. A. Modelirovanie pozhara v mashinnom zale elektrostancii dlya ocenki meropriyatij po povysheniyu ognestojkosti ego pokrytiya // Tekhnologii tekhnosfernoj bezopasnosti. 2015. № 2 (60). P. 38–48. URL: <http://ipb.mos.ru/ttb>.