

*А.Ю. Акулов, Р.С. Сатюков, С.В. Субачев, А.А. Субачева*  
(Уральский институт ГПС МЧС России; e-mail: sergey-subachev@yandex.ru)

## **МОДЕЛИРОВАНИЕ ПОЖАРА В МАШИННОМ ЗАЛЕ ЭЛЕКТРОСТАНЦИИ ДЛЯ ОЦЕНКИ МЕРОПРИЯТИЙ ПО ПОВЫШЕНИЮ ОГНЕСТОЙКОСТИ ЕГО ПОКРЫТИЯ**

*Изложены результаты моделирования пожара в машинном зале электростанции до и после реализации мероприятий по повышению предела огнестойкости ферм его покрытия.*

*Ключевые слова: моделирование пожаров в зданиях, полевая модель пожара, противопожарные мероприятия.*

## **A.Yu. Akulov, R.S. Satyukov, A.A. Subacheva, S.V. Subachev** **SIMULATION OF FIRE IN MACHINE HALL OF POWER PLANT** **FOR EVALUATION OF MEASURES AIMED** **AT IMPROVING FIRE RESISTANCE THEIR COVER**

*The results of the simulation of a fire in the machine hall of the power plant before and after implementation of measures aimed at improving the actual limit of fire resistance of farms cover is presented.*

*Key words: modeling of fires in buildings, field model of fire, fire prevention measures.*

Статья поступила в редакцию Интернет-журнала 20 марта 2015 г.

В машинных отделениях тепловых и атомных электростанций наибольшую опасность по масштабам возможных последствий представляют собой аварии, приводящие к разрушению турбины, что влечёт за собой пролив большого количества масла, нередко выброс водорода, возникновение пожаров и взрывов.

Количество вышедшего наружу масла из систем управления и смазки турбины может достигать нескольких тонн, что объясняется наличием маслобаков большой емкости и разветвленной сети высоконапорных маслопроводов.

При высокой скорости выгорания и большом удельном тепловыделении масла режим пожара становится таким, что достижение критической температуры незащищенных металлоконструкций и их обрушение может произойти буквально в течение первых минут горения.

## 1. Краткое описание модели и численного эксперимента

Приведена оценка эффективности предлагаемых инженерно-технических мероприятий, направленных на повышение фактического предела огнестойкости ферм покрытия машинного отделения электростанции в наиболее неблагоприятных сценариях развития пожара.

Цель моделирования – получение данных об изменениях температуры поверхности строительных конструкций машинного отделения в наиболее неблагоприятных сценариях развития пожара с учётом применения различных вариантов инженерно-технических мероприятий.

В статье приведены результаты моделирования прогрева конструкций при базовом варианте и с учётом устройства в покрытии машинного отделения 36 люков площадью по  $6 \text{ м}^2$ , служащих для сброса тепловой энергии и продуктов горения в атмосферу.

Авторами проведены работы:

- выбор расчётной модели;
- построение топологии здания электростанции, формулирование пожароопасных свойств горючей нагрузки;
- моделирование развития пожара и получение данных об изменении температуры поверхности применяемых строительных конструкций без применения и с применением дополнительных инженерно-технических мероприятий.

Моделирование выполнено в программе FDS с использованием графического интерфейса PyroSim.

**FDS (Fire Dynamic Simulator)** реализует вычислительную гидродинамическую модель (CFD) тепломассопереноса при горении. FDS численно решает уравнения Навье-Стокса для низкоскоростных температурно-зависимых потоков, особое внимание уделяется распространению дыма и теплопередаче при пожаре. Модель представляет собой систему уравнений в частных производных, включающую уравнение сохранения массы, момента и энергии, и решается на трехмерной регулярной сетке. Тепловое излучение рассчитывается методом конечных объёмов на этой же сетке.

На сегодняшний день приблизительно половина приложений модели используется для проектирования систем дымоудаления и изучения активации спринклеров и детекторов. Основной целью FDS на протяжении своего развития было решение прикладных задач пожарной безопасности и, в то же время, обеспечение инструментом для изучения фундаментальных процессов при пожаре.

Программа разрабатывается лабораторией строительных и пожарных исследований (BFRL) Национального института стандартов и технологий США. Вклад в исследования и развитие модели внесли сотрудники комиссии по ядерному регулированию США (NRC), центра научно-технических исследований Финляндии (VTT), общества инженеров по пожарной безопасности (SFPE) и др.

Подробнее с математической моделью FDS можно ознакомиться в техническом руководстве [1].

Модель FDS подверглась подробным оценочным исследованиям, проводимым специалистами Национального института стандартов и технологий США (NIST) и других организаций. Подробнее результаты валидации FDS приведены в документе "Technical Reference Guide. Volume 3: Validation" [2].

Пожароопасные свойства турбинного масла, необходимые для моделирования развития пожара, приведены в табл. 1 (характеристики приняты по базе данных типовых горючих нагрузок [3]).

Таблица 1

### Характеристики пожароопасных свойств горючей нагрузки

Характеристика	Горючая нагрузка	Турбинное масло
Низшая теплота сгорания, $MДж/кг$		41,9
Удельная скорость выгорания, $кг/м^2 \cdot с$		0,03
Дымообразующая способность, $Нп м^2/кг$		243
Удельный расход кислорода, $кг/кг$		-0,282
Удельный выход токсичных газов, $кг/кг$	CO <sub>2</sub>	0,70
	CO	0,122
	HCl	0

В качестве одного из наиболее неблагоприятных сценариев пожара рассматривается розлив масла на большой площади поверхности турбины и его воспламенение в результате контакта с высокотемпературными частями оборудования. В этом случае будет наблюдаться загорание масла практически сразу по всей площади, сопровождающееся большим тепловыделением и интенсивным нагревом ферм пламенем.

### Топология объекта

В главном корпусе электростанции размещается оборудование, предназначенное для сжигания природного газа в котлах с получением пара, а также преобразования в турбинах тепловой энергии пара в механическую и далее в генераторе в электрическую энергию.

Главный корпус скомпонован из турбинного, деаэрационного, котельного и дымососного отделений.

В главном корпусе установлено 6 блоков мощностью по 800 *МВт*.

Основное оборудование блоков:

- турбина типа К-800-240-5;
- генератор типа ТВВ-800-2УЗ;
- котлоагрегат – прямоточный, однокорпусной типа ПП-2650-255ГМ.

Общая протяженность главного корпуса – 575 м, ширина – 120 м. Высота – 83 м. Общая площадь 103680 м<sup>2</sup>. Длина ячейки блока – 72 м.

Каркас главного корпуса стальной, стены до отметки 15,6 м выполнены из навесных керамзитобетонных панелей. Выше этой отметки стены выполнены из трехслойных трудносгораемых панелей марки ПСМ. Несущие конструкции покрытий стальные.

Модель главного корпуса для использования в программе FDS выполнена в графическом интерфейсе Pyrosim 2015 (рис. 1).

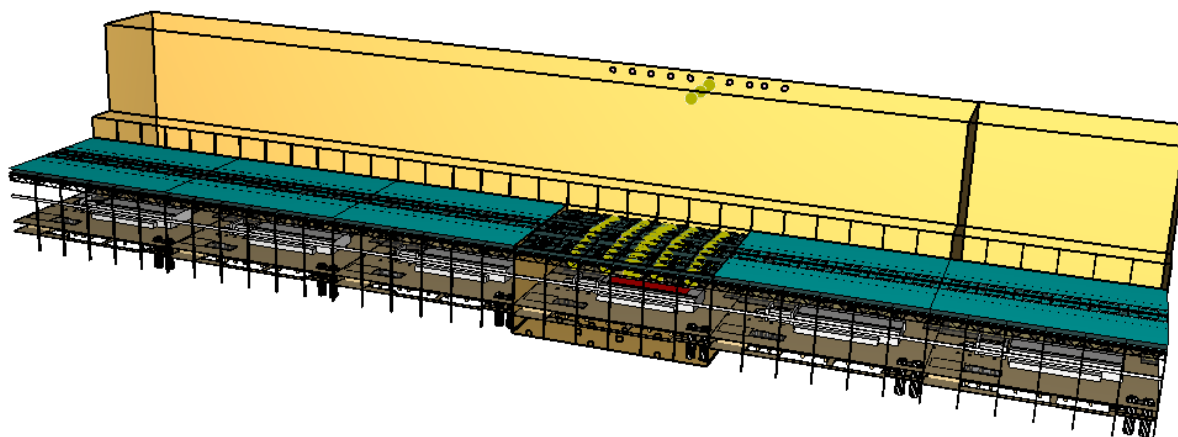


Рис. 1. Модель главного корпуса

В качестве расчётного принят один из блоков (четвертый), при этом машинное отделение, в котором располагается очаг пожара и анализируется динамика температуры, выполнено с наибольшей детализацией, а деаэрационная и другие отделения – с меньшей, так как влияние находящегося в них оборудования на развитие пожара в машинном отделении пренебрежимо мало (рис. 2, 3).

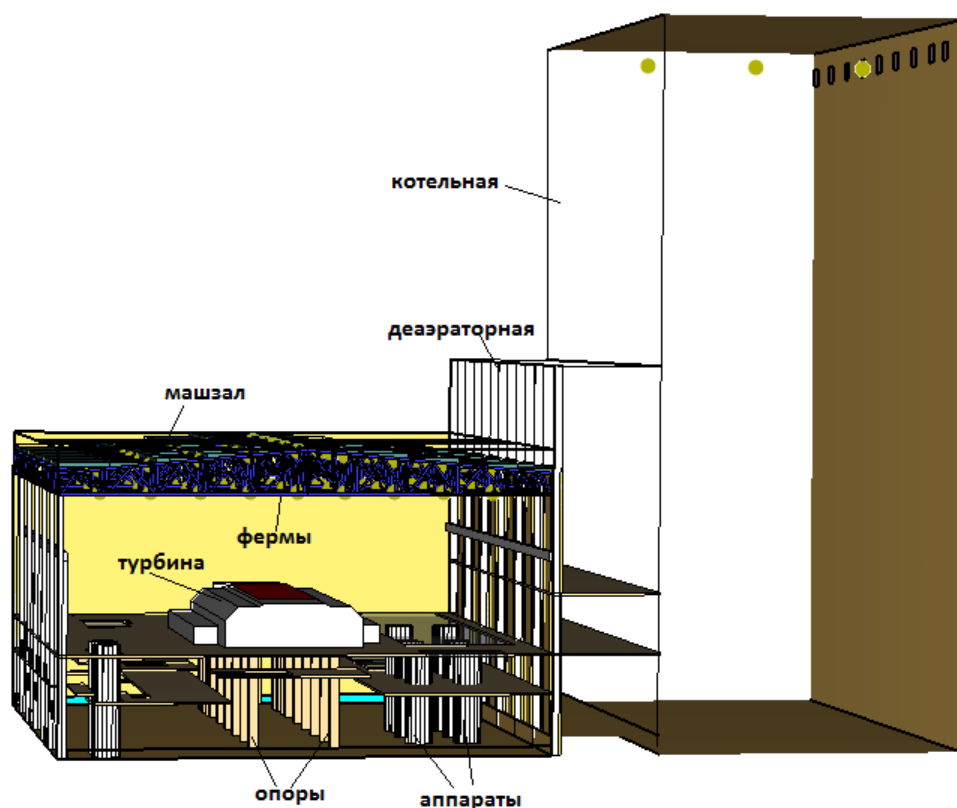


Рис. 2. Модель четвёртого (расчётного) блока

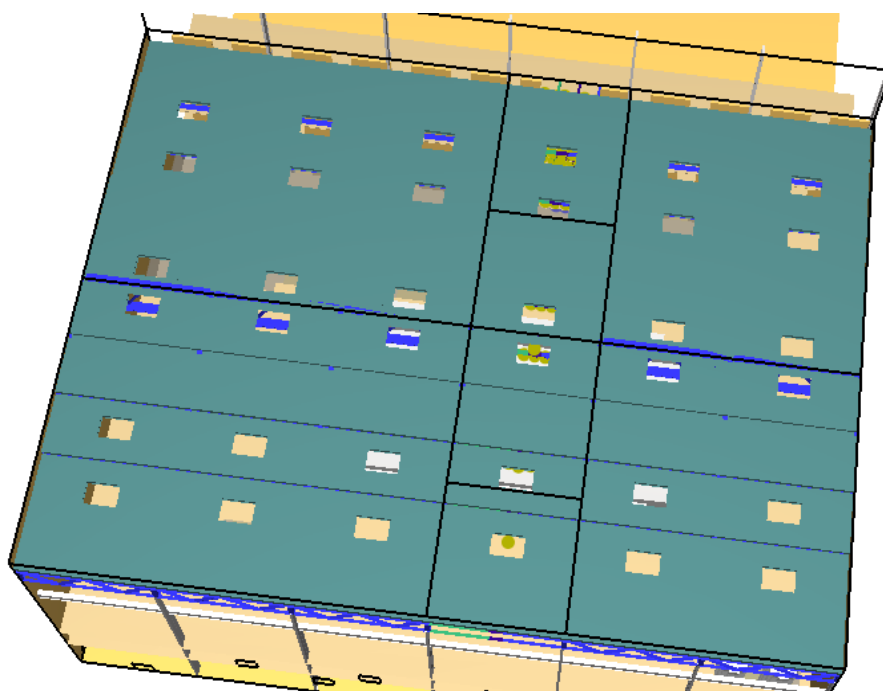


Рис. 3. Расположение люков в покрытии

### *Расчётные сетки*

Объём блока разбит на 16 расчётных сеток (рис. 4). Сетки имеют различные размеры и количество ячеек (табл. 2) – возле источника пожара и расчётных ферм ячейки сетки меньше, вдали от источника ячейки больше. Это позволяет, во-первых, повысить точность расчёта, во-вторых, обеспечить более равномерную загрузку расчётных мощностей.

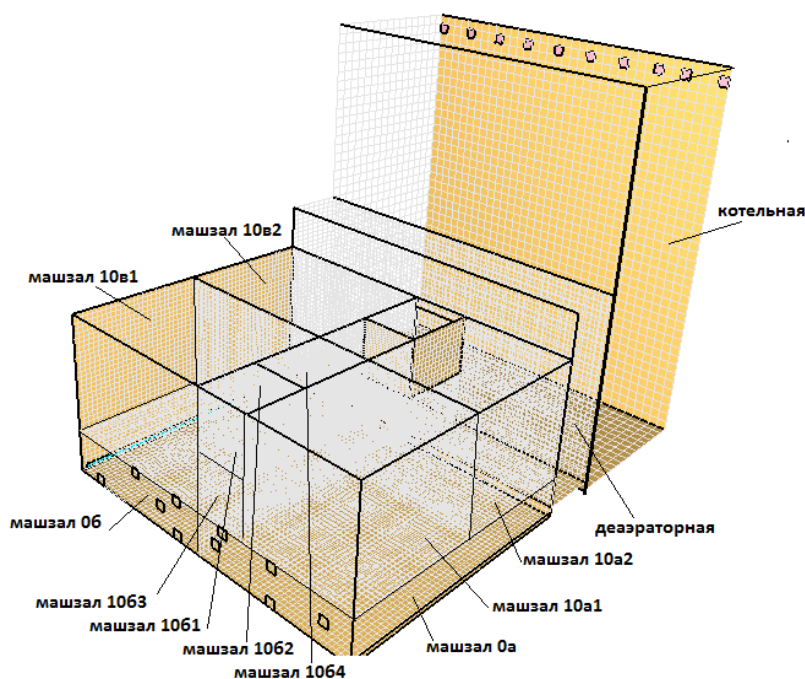


Рис. 4. Расположение расчётных сеток

**Характеристики расчётных сеток**

№	Сетка	Геометрические размеры, м	Размеры ячеек, м	Количество ячеек в сетке
1	Машзал 0а	36×54×9	1×1×1	17496
2	Машзал 0б	36×54×9	1×1×1	17496
3	Машзал 10а1	24×27×24	1×1×1	15552
4	Машзал 10а2	24×27×24	1×1×1	15552
5	Машзал 10б1	12×12×12	0,5×0,5×0,5	13824
6	Машзал 10б2	12×15×12	0,5×0,5×0,5	17280
7	Машзал 10б3	12×12×12	1×1×1	1728
8	Машзал 10б4	12×15×12	1×1×1	2160
9	Машзал 10б5	12×12×12	0,5×0,5×0,5	13824
10	Машзал 10б6	12×15×12	0,5×0,5×0,5	17280
11	Машзал 10б7	12×12×12	1×1×1	1728
12	Машзал 10б8	12×15×12	1×1×1	2160
13	Машзал 10в1	36×27×24	1×1×1	23328
14	Машзал 10в1	36×27×24	1×1×1	23328
15	Котельная	72×34×80	2×2,125×2	23040
16	Дезараторная	72×12×40	1×1,5×1	23040

Общее количество ячеек в модели – 459 216. Общий расчётный объём – 358 704 м<sup>3</sup>.

**Свойства поверхностей**

Фермы выполнены из стали С345 приведённой толщины 2,4 мм, колонны – из стали С345 приведённой толщины 16,3 мм, ригели – из стали С345 приведённой толщины 9,6 мм. Для стали приняты следующие параметры [4]: плотность – 7890 кг/м<sup>3</sup>; удельная теплоёмкость – 0,461...0,595 кДж/кг·К; теплопроводность – 27...80 Вт/м·К (табл. 3).

Таблица 3

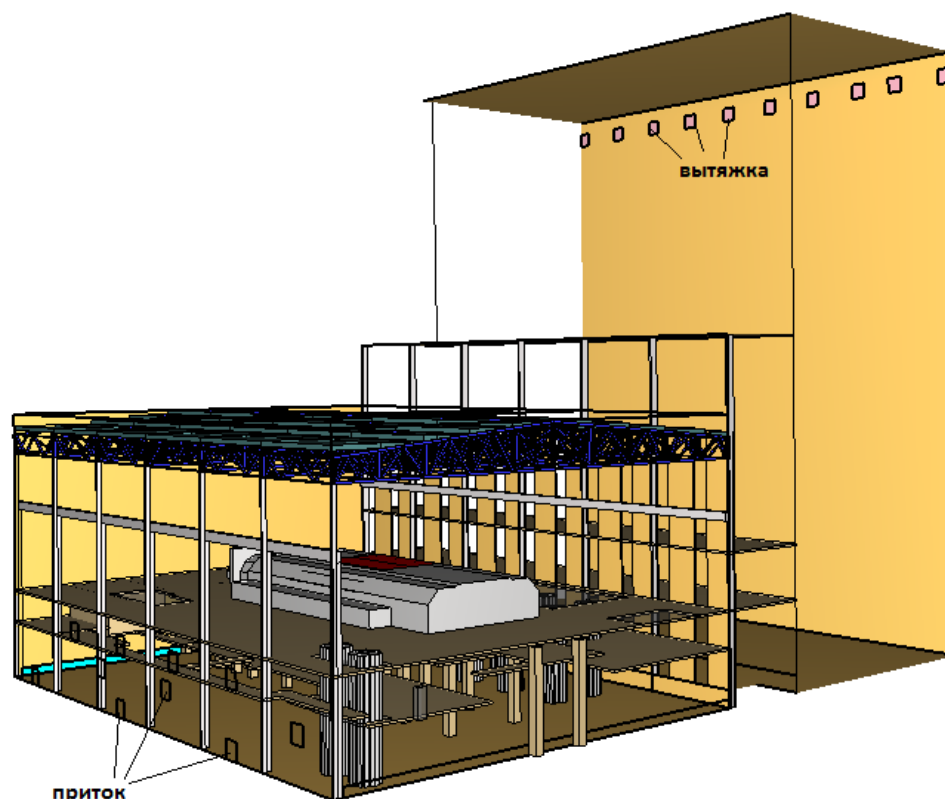
**Температурная зависимость теплоёмкости и теплопроводности**

<i>T, К</i>	<i>λ, Вт/м·К</i>	<i>C, Дж/кг·К</i>
293,15	80	461
373,15	58	494
473,15	54	515
573,15	49	536
673,15	45	549
773,15	40	561
873,15	36	574
973,15	32	595
1073,15	29	-
1173,15	27	-

## ***Вентиляция***

В каждом блоке оборудована общеобменная принудительная вентиляция. Приток осуществляется в нижнюю часть машзала через 10 отверстий, расход – через каждое отверстие  $55,56 \text{ м}^3/\text{с}$  (200 тыс.  $\text{м}^3/\text{ч}$ ), общий приток – через все отверстия – 2 млн  $\text{м}^3/\text{ч}$ .

Вытяжка осуществляется в верхней части котельного отделения через 10 отверстий, расход – через каждое отверстие  $55,56 \text{ м}^3/\text{с}$  (200 тыс.  $\text{м}^3/\text{ч}$ ), общая вытяжка через все отверстия – 2 млн  $\text{м}^3/\text{ч}$ .



**Рис. 5.** Расположение приточных и вытяжных отверстий

## ***Датчики температуры на фермах***

Для определения времени достижения критической температуры ферм используются датчики температуры, установленные на фермах на глубине 0,1 мм от поверхности стали.

Номер датчика имеет вид  $Na-ij$ , где  $N$  – номер варианта защиты фермы,  $a$  – индекс расположения датчика на ферме (вверху или внизу),  $i$  – номер пояса ферм,  $j$  – индекс датчика на ферме.

Например, 1n-42 означает, что рассматривается первый вариант (без огнезащиты), датчик расположен вторым на нижней ферме четвертого пояса.

На каждой ферме расположен датчик внизу (индекс –  $n$ ) и вверху (индекс –  $v$ ). Например, на расчётной ферме датчики расположены так, как показано на рис. 6. Расположение датчиков по поясам ферм показано на рис. 7.

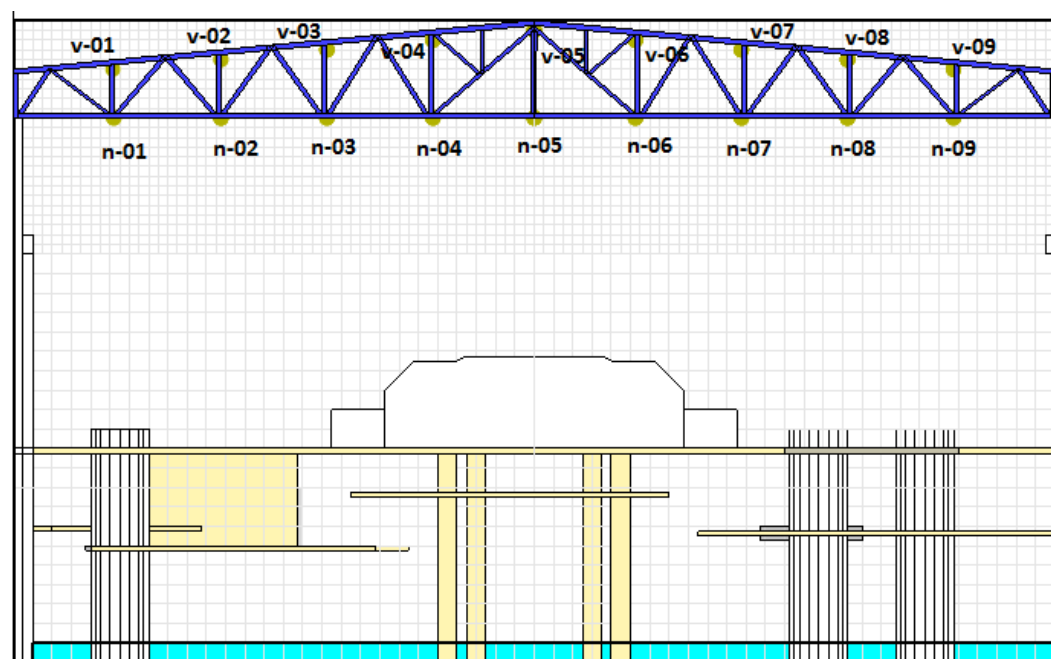


Рис. 6. Расположение датчиков вдоль фермы

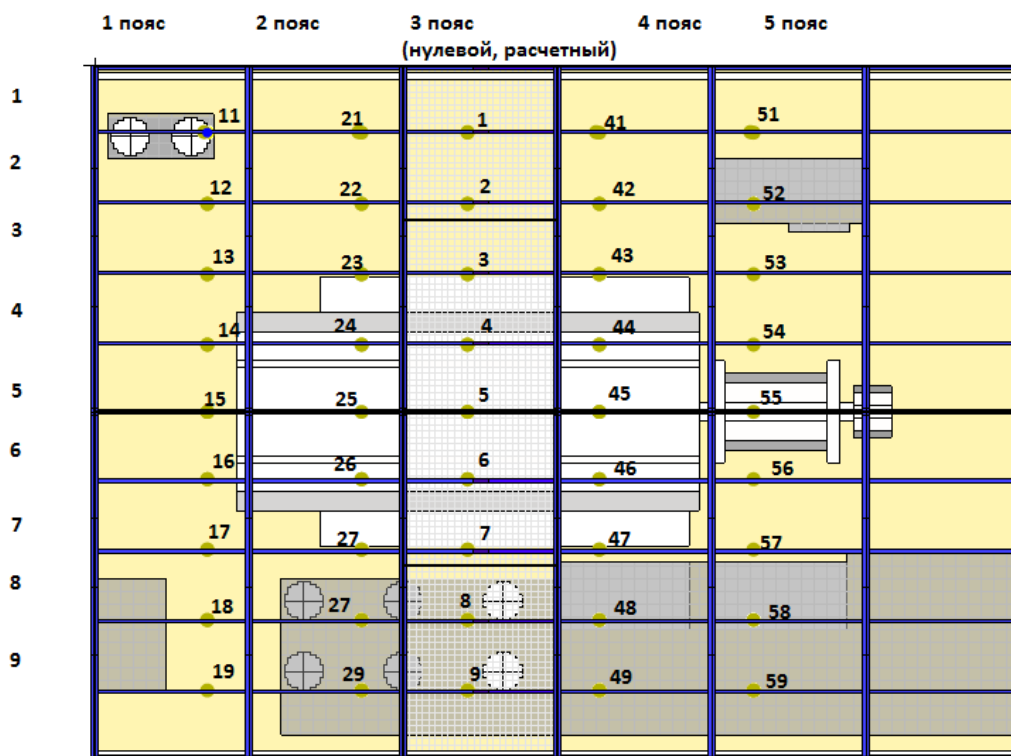
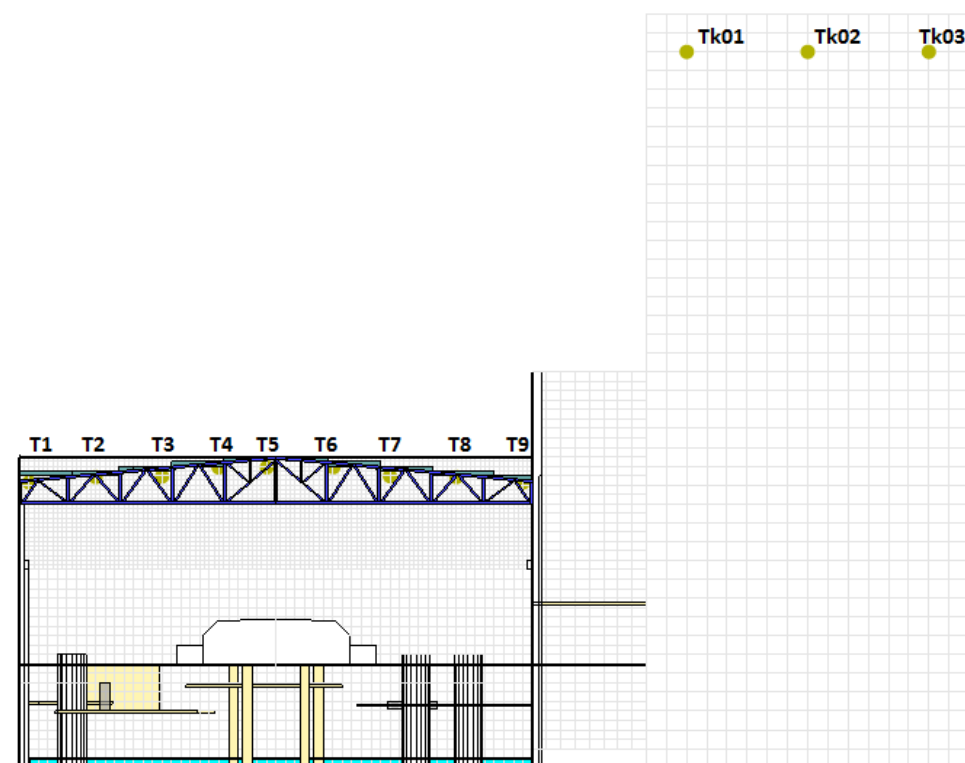


Рис. 7. Расположение датчиков по поясам ферм



### *Датчики температуры газовой среды*

Для контроля температуры газовой среды используются датчики температуры возле ферм четвертого пояса, а также в верхней части котельного отделения (рис. 8).



**Рис. 8.** Датчики температуры воздуха

## **2. Аппаратное обеспечение**

Для проведения нижеописанных расчётов использовался кластер, состоящий из 5 компьютеров со следующими характеристиками каждый:

- 2 процессора по 8 ядер (2,93 ГГц);
- оперативная память 32 Гб.

Скорость сети 10 Гбит/с.

Кластер основан на технологиях Intel MPI и OpenMP.

MPI (Message Passing Interface, интерфейс передачи сообщений) является наиболее распространённым стандартом интерфейса обмена данными в параллельном программировании.

OpenMP (Open Multi-Processing) реализует параллельные вычисления в многопроцессорных системах с общей памятью.

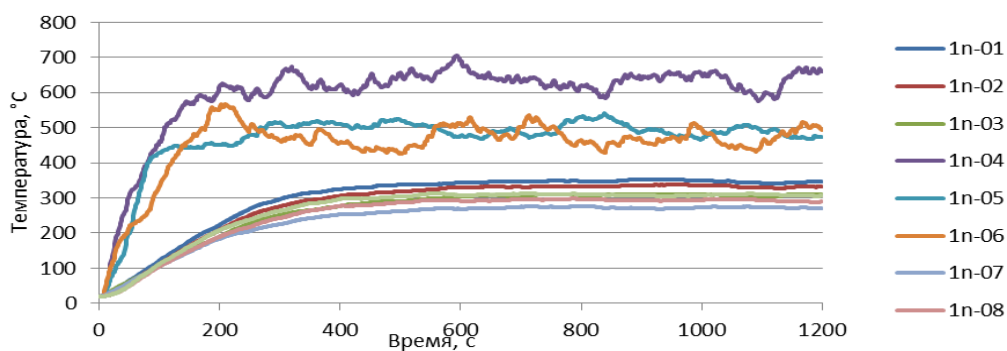
При такой конфигурации моделирование горения в течение 10 минут при 100 %-й загрузке компьютеров требует приблизительно 2 суток машинного времени.

В расчётах с моделированием движения частиц (воды или масла) требуемое время расчёта значительно увеличивается. Так, моделирование 1 минуты горения фонтана масла, с учётом работы водяных оросителей, занимает не менее 4 суток.

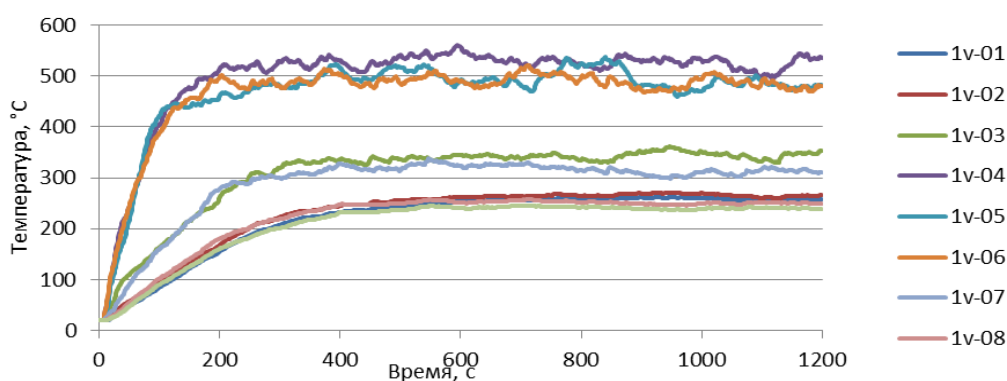
### 3. Результаты моделирования

В рамках настоящей публикации не представляется возможным представить подробно все полученные результаты моделирования, авторы ограничиваются анализом температуры поверхности элементов 3-го пояса фермы, расположенного непосредственно над площадью горения (рис. 9-12).

#### *Исходный вариант*

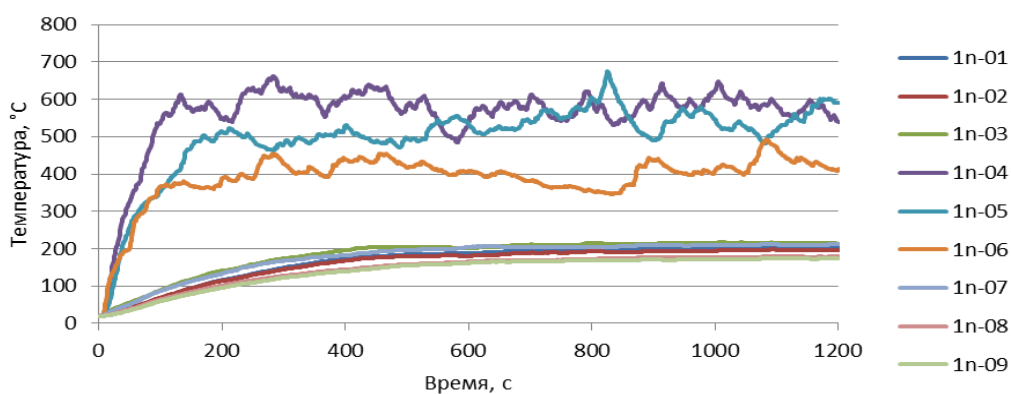


**Рис. 9.** Температура нижних элементов фермы



**Рис. 9.** Температура верхних элементов фермы

#### *Вариант с устройством люков*



**Рис. 10.** Температура нижних элементов фермы

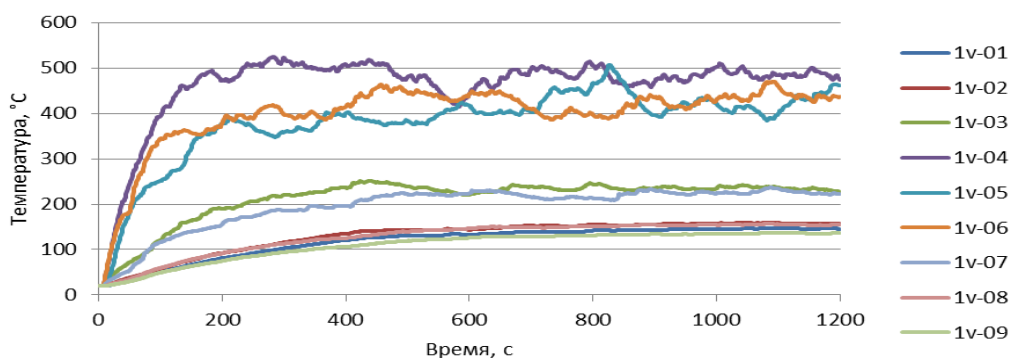


Рис. 11. Температура верхних элементов фермы

#### 4. Выводы

Увеличение газообмена при увеличении мощности систем вентиляции, вскрытии остекления или открытии дверных и оконных проёмов не всегда приводит к желаемому снижению опасных факторов пожара. Нередко это приводит к обратному результату. Так происходит, когда пожар развивается в режиме ПРВ (пожар, регулируемый вентиляцией). При увеличении газообмена увеличивается содержание кислорода, пожар постепенно переходит в режим ПРН (пожар, регулируемый нагрузкой), увеличивается скорость выгорания, полнота сгорания, скорость распространения пламени, что ведет, наоборот, к повышению (иногда резкому) температуры и других опасных факторов пожара. Так как режим пожара зависит от очень многих факторов, в большинстве случаев режим пожара можно спрогнозировать только путем его моделирования.

Результаты проведенного исследования подтвердили гипотезу о том, что наличие дополнительных люков в покрытии машинного отделения позволит снизить тепловую нагрузку на фермы. Для ряда элементов температура нагрева снижается на 100 °С. Особенно это заметно для элементов, которые прогреваются не непосредственно пламенем, а конвективными потоками воздуха. В совокупности с другими мероприятиями по огнезащите, устройство люков в покрытии машзала, возможно, позволит обеспечить фактическую огнестойкость ферм в течение времени, необходимого для ликвидации пожара.

#### Литература

1. *Fire Dynamics Simulator*. Technical Reference Guide. Vol. 1: Mathematical Model / NIST Special Publication 1018-1. Sixth Edition. 2015.
2. *Fire Dynamics Simulator*. Technical Reference Guide. Vol. 3: Validation / NIST Special Publication 1018-3. Sixth Edition. 2015.
3. **Кошмаров Ю.А.** Прогнозирование опасных факторов пожара в помещении: учеб. пособие. М.: Академия ГПС МЧС России, 2000. 118 с.
4. **Крекулева Р.А., Черепанов О.И., Черепанов Р.О.** Численное моделирование термомеханических процессов в зоне сварного шва плакированных сталей на стадии остывания // Физическая мезомеханика. № 3 (15). 2012. С. 71-78.
5. **Субачева А.А., Сысоев В.А.** Анализ произошедшего пожара с помощью вероятностной интегральной модели пожара в здании // Актуальные проблемы обеспечения безопасности в Российской Федерации: матер. VI всеросс. науч.-практ. конф. Екатеринбург: Уральский институт ГПС МЧС России, 2012. С. 146-148.
6. **Субачева А.А.** Перспективы применения методов моделирования пожаров для экспертизы произошедших пожаров // Безопасность критических инфраструктур и территорий: матер. V всеросс. конф. и XV школы молодых учёных. Екатеринбург: УрО РАН, изд-во АМБ, 2012. С. 178-180.