

УДК 536.1

Методика расчета режимов прогрева строительных конструкций в условиях внутреннего пожара

Канд. техн. наук **Н. Н. РОМАНОВ**¹, канд. пед. наук **А. А. КУЗЬМИН**¹,
канд. пед. наук **А. А. ПЕРМЯКОВ**¹, д-р техн. наук **А. В. ФЕДОРОВ**²,
канд. техн. наук **М. А. СИМОНОВА**³

¹Санкт-Петербургский университет государственной противопожарной службы МЧС России

²Университет ИТМО

³Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого

E-mail: afedorov@itmo.ru

Рассматриваются и обсуждаются результаты экспериментальных исследований по изучению особенности теплового режима пожара на объектах с различной пожарной нагрузкой. Для проведения экспериментов предложен численный расчет температурных полей и оценки огнестойкости несущих конструкций с функциональными возможностями разработанного программного комплекса. Данный программный комплекс позволяет автоматизировать и оптимизировать расчет температурного режима пожара в помещении и параметров температурного поля по толщине несущих и ограждающих конструкций при пожаре в помещениях с различной пожарной нагрузкой для оценки огнестойкости строительных конструкций. Результатом работы явилось создание специального модульного программного продукта, работающего в среде Microsoft Office Excel с применением Visual Basic for Applications и обеспечивающий оперативное редактирование исходных данных.

Ключевые слова: температурное поле, пожарная нагрузка, температурный режим, программный комплекс.

Информация о статье:

Поступила в редакцию 26.01.2021, принята к печати 26.02.2021

DOI: 10.17586/1606-4313-2021-20-1-84-93

Язык статьи — русский

Для цитирования:

Романов Н. Н., Кузьмин А. А., А. А. Пермяков, Федоров А. В., Симонова М. А. Методика расчета режимов прогрева строительных конструкций в условиях внутреннего пожара // Вестник Международной академии холода. 2021. № 1. С. 84–93. DOI: 10.17586/1606-4313-2021-20-1-84-93

Methodology for calculating heating modes of building structures in an internal fire

Ph. D. **N. N. ROMANOV**¹, Ph. D. **A. A. KUZMIN**¹, Ph. D. **A. A. PERMYAKOV**¹,
D. Sc. **A. V. FEDOROV**², Ph. D. **M. A. SIMONOVA**³

¹Saint-Petersburg University of State Fire Service of Emercom of Russia

²ITMO University

³Peter the Great Saint Petersburg Polytechnic University

E-mail: afedorov@itmo.ru

The article considers and discusses the results of experimental studies to study the features of the thermal regime of a fire at objects with different fire loads. For the experiments, a numerical calculation of temperature fields and an assessment of the fire resistance of load-bearing structures with the functionality of the developed software package are proposed. This software package allows you to automate and optimize the calculation of the temperature regime of a fire in a room and the parameters of the temperature field along the thickness of load-bearing and enclosing structures in case of fire in rooms with different fire loads to assess the fire resistance of building structures. The result of the work was the creation of a special modular software product operating in the Microsoft Office Excel environment with the use of Visual Basic for Applications and providing online editing of the initial data.

Keywords: temperature field, fire load, temperature regime, software package.

Article info:

Received 26/01/2021, accepted 26/02/2021
 DOI: 10.17586/1606-4313-2021-20-1-84-93
 Article in Russian

For citation:

Romanov N. N., Kuzmin A. A., Permyakov A. A., Fedorov A. V., Simonova M. A. Methodology for calculating heating modes of building structures in an internal fire. *Journal of International Academy of Refrigeration*. 2021. No 1. p. 84–93. DOI: 10.17586/1606-4313-2021-20-1-84-93

Введение

На практике, при решении вопросов пожарной безопасности, как правило, приходится заниматься проблемами огнестойкости строительных конструкций в условиях реальных пожаров. Процесс передачи тепла в конструкциях при температурном режиме пожара имеет ряд особенностей, вызванных разнообразием и зависимостью теплофизических свойств материалов конструкций от температуры, а также влиянием вида и параметров пожарной нагрузки.

Исходя из этого, выполнение поставленной задачи сводится к решению двух совместных теплофизических задач [2]:

— расчет изменения температуры продуктов горения в помещении во времени в зависимости от пожарной нагрузки;

— расчет изменения температуры прогрева в ограждающих конструкциях до наступления предельного состояния.

Постановка задачи

Моделирование пожароопасных ситуаций — это один из способов, позволяющий обосновывать оптимальные решения в области обеспечения пожарной безопасности.

Один из геометрических параметров строительных конструкций, как правило, больше двух остальных, в качестве примера — железобетонная плита перекрытия имеет толщину меньше по сравнению с длиной и шириной [16].

Таким образом, нахождение изменения температуры по одной координате, возможно при решении дифференциального уравнения теплопроводности [10]:

$$\frac{\partial t}{\partial \tau} = a(t) \cdot \frac{\partial^2 t}{\partial x^2} \quad (1)$$

В случае одностороннего равномерного прогрева плиты толщиной δ , в условиях внутреннего пожара, необходимо учитывать:

— распределение температур по толщине плиты перед возникновением пожара:

$$t(x, 0) = t_0; \quad (2)$$

— изменения условий теплообмена на обогреваемой и необогреваемой поверхностях, соответственно:

$$\left. \frac{\partial t}{\partial x} \right|_{x=0} = -\frac{\alpha_1(\tau)}{\lambda} \cdot [t(0, \tau) - t_{f1}(\tau)]; \quad (3)$$

$$\left. \frac{\partial t}{\partial x} \right|_{x=\delta} = -\frac{\alpha_2(\tau)}{\lambda} \cdot [t(\delta, \tau) - t_{f2}(\tau)].$$

Здесь $\alpha_1(\tau)$, $\alpha_2(\tau)$ — коэффициенты теплообмена между поверхностями плиты со стороны продуктов горения и воздуха [8], Вт/(м²·°C), соответственно; $t_{f1}(\tau)$ — среднеинтегральная температура в помещении в условиях пожара; $t_{f2}(\tau)$ — температуры окружающей среды со стороны наружной поверхности стены; t_0 — температура по толщине стенки в начальный момент времени.

Коэффициент теплообмена $\alpha_1(\tau)$ между поверхностью плиты и продуктами горения, согласно [1], рассчитывается по формуле:

$$\alpha_1(\tau) = 11,63e^{0,0023 \cdot t_{f1}(\tau)}. \quad (4)$$

Коэффициент теплообмена между необогреваемой поверхностью и окружающим воздухом $\alpha_2(\tau)$, учитывает распространение тепла за счет конвекции α_k и распространение за счет излучения $\alpha_{\text{л}}$:

$$\alpha_2(\tau) = \alpha_k + \alpha_{\text{л}}. \quad (5)$$

При естественной конвекции в большом объеме конвективная составляющая α_k определяется по формулам [12]:

$$\alpha_k = \frac{\text{Nu}_m}{\ell} \cdot \lambda_{f2}(\tau);$$

$$\text{Nu}_m = C(\text{Gr}_m \cdot \text{Pr}_m)^n \cdot \left(\frac{\text{Pr}_f}{\text{Pr}_w} \right)^{0,25}.$$

Коэффициент теплообмена, учитывающий распространение тепла за счет излучения определяется по формуле [10]:

$$\alpha_{\text{л}} = \frac{C_0 \varepsilon_{\text{гр}} \left[\left(\frac{T_{f2}}{100} \right)^4 - \left(\frac{T(\delta, \tau)}{100} \right)^4 \right]}{t_{f2}(\tau) - t(\delta, \tau)}. \quad (6)$$

В случае применения неявной разностной схемы, аппроксимация соответствующих производных уравнения (1) при его решении, необходимо выполнение определенного условия разбиения на временные и пространственные слои (Δt и Δx) [8]:

$$\Delta \tau \leq \frac{0,5}{\frac{a}{\Delta x^2} + \frac{\alpha_{\text{max}}}{c\rho \Delta x}}.$$

В этом случае, решения выглядят следующим образом: — температура по толщине ограждения $t(x_i, \tau_j)$, т. е. температура в точке с координатами $x_i = i\Delta x$ и $\tau_j = j\Delta \tau$ рассчитываются по формуле:

$$t_{i,j} = \text{Fu}_i \left[t_{i-1,j} + t_{i+1,j} + t_{i,j} \left(\frac{1}{\text{Fu}_i} - 2 \right) \right]; \quad (7)$$

— температура на обогреваемой поверхности:

$$t_{0,j} = \frac{t_{1,j-1} + \text{Bu}_i \cdot t_{f1} + t_{0,j-1} \cdot \frac{1}{2 \cdot \text{Fu}_i}}{1 + \text{Bu}_i + \frac{1}{2 \cdot \text{Fu}_i}}; \quad (8)$$

— температура на необогреваемой поверхности определяется уравнением:

$$t_{n,j} = t_{n-1,j} - \frac{\Delta x}{\lambda(\bar{t})} \alpha_2 \left(\frac{t_{n-1,j} - t_{f2}}{2} \right). \quad (9)$$

Здесь $\text{Fu}_i = \frac{a(\bar{t})\Delta\tau}{\Delta x^2}$; $\text{Bu}_i = \frac{\alpha_1 L}{\lambda(\bar{t})}$; $a(\bar{t})$ — коэффициент

температуропроводности, $\text{m}^2/\text{с}$; $\lambda(\bar{t})$ — коэффициент теплопроводности материала конструкции, $\text{Вт}/(\text{м} \cdot ^\circ\text{C})$.

В реальных условиях изменение температур происходит в широком диапазоне значений, поэтому при расчетах все теплофизические свойства материалов ограждающих конструкций вычисляются по средней температуре:

$$\bar{t} = \frac{t_{i,j} + t_{i+1,j}}{2}.$$

Данная расчетная схема легла в основу разработанного программного продукта по расчету прогрева ограждающих конструкций в условиях пожара.

Обоснованность применения предлагаемой расчетной схемы по определению изменения искомой температуры в условиях реального внутреннего пожара доказана путем сравнения результатов численных экспериментов, применяющих эту методику, и результатов огневых испытаний. В качестве образцов для сравнения рассматривались материалы, существенно отличающиеся друг от друга по своим теплофизическим свойствам — бетоны на различных заполнителях и конструкционный керамзитобетон. Характер изменения температуры греющей среды во время проведения экспериментов, согласно [1], определялся зависимостью:

$$t_f = 345 \cdot \lg(8\tau + 1) + t_0.$$

Результаты сопоставления представлены на рис. 1–4 и в табл. 1, 2.

Сравнительный анализ результатов расчета и экспериментальных данных показал, что расхождение значений не превышает 15–20%, несмотря на существенные различия таких теплофизических свойств материалов, как плотность, теплоемкость и теплопроводность, что подтверждает возможность использования данной расчетной схемы для расчета изменения температуры по толщине ограждающих конструкций.

Так как изменение температуры в условиях реального внутреннего пожара на объекте нефтеперерабатывающей промышленности может существенно отличаться

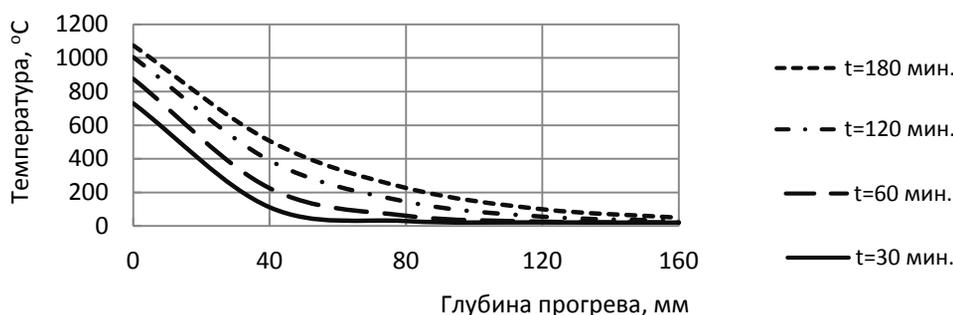


Рис. 1. Изменение температуры прогрева в конструкционном керамзитобетоне

Fig. 1. Changes of the heating temperature in structural keramzit concrete

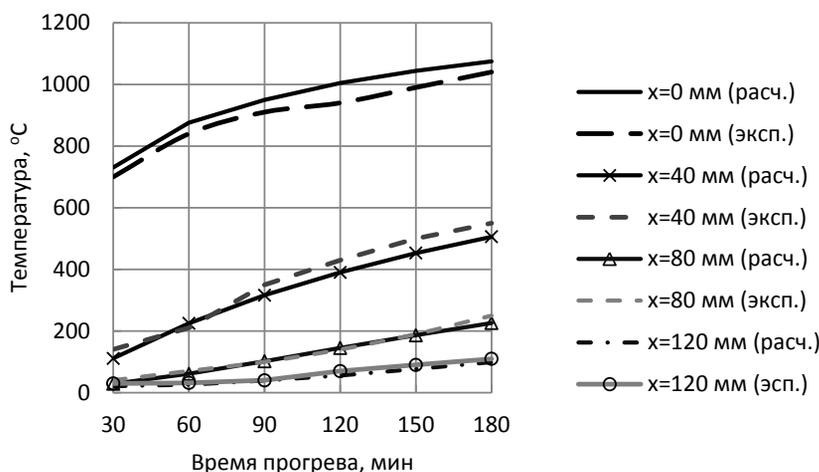


Рис. 2. График сопоставления результатов расчетов с данными испытаний керамзитобетона

Fig. 2. Comparison of calculation results with keramzit concrete test data

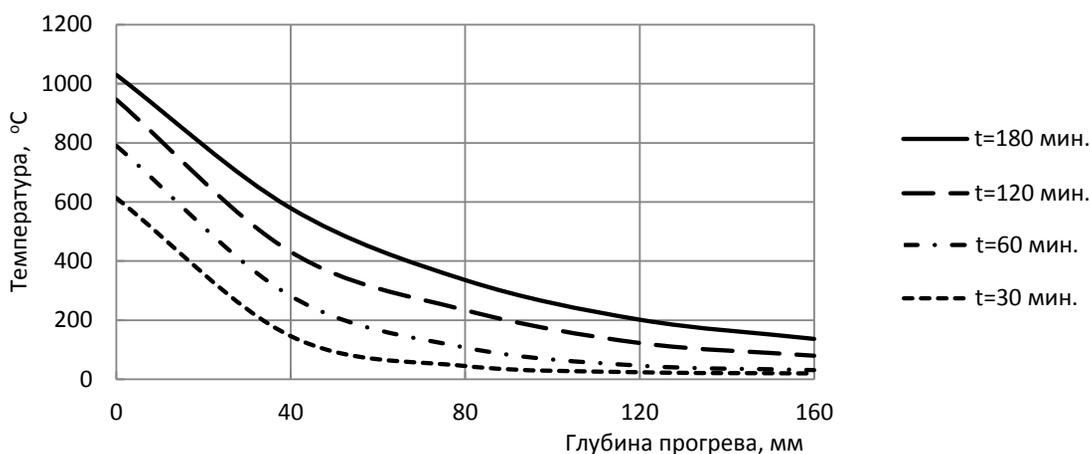


Рис. 3. Изменение температуры прогрева в тяжелом бетоне на известковом заполнителе
 Рис. 3. Changes of the heating temperature in heavy lime concrete

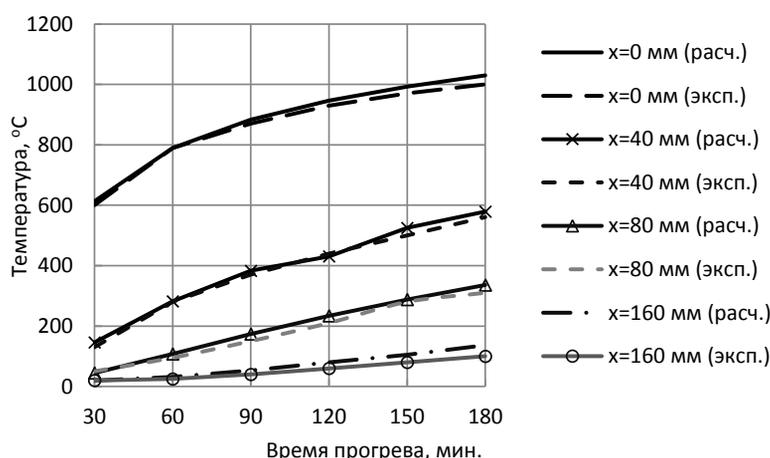


Рис. 4. График сопоставления результатов расчета с данными испытаний тяжелого бетона на известковом заполнителе
 Fig. 4. Comparison of calculation results with heavy lime concrete test data

Таблица 1

Сопоставление результатов численных экспериментов прогрева конструкционного керамзитобетона с данными огневых испытаний

Comparison of numerical experiments' results with fire test data

Table 1

| Глубина прогрева, мм | 30 мин. | | 60 мин. | | 90 мин. | | 120 мин. | | 150 мин. | | 180 мин. | |
|----------------------|---------|-------|---------|-------|---------|-------|----------|-------|----------|-------|----------|-------|
| | Расчет | Эксп. | Расчет | Эксп. | Расчет | Эксп. | Расчет | Эксп. | Расчет | Эксп. | Расчет | Эксп. |
| 0 | 730 | 700 | 876 | 840 | 950 | 910 | 1004 | 940 | 1044 | 990 | 1075 | 1040 |
| 40 | 111 | 140 | 225 | 210 | 316 | 350 | 390 | 430 | 453 | 500 | 506 | 550 |
| 80 | 29 | 40 | 61 | 70 | 102 | 100 | 145 | 140 | 186 | 190 | 226 | 250 |
| 120 | 21 | 30 | 26 | 32 | 39 | 40 | 56 | 70 | 76 | 90 | 98 | 110 |
| 160 | 20 | 20 | 21 | 22 | 25 | 23 | 31 | 30 | 38 | 45 | 46 | 55 |

Таблица 2

Сопоставление результатов численных экспериментов прогрева тяжелого бетона на известковом заполнителе с данными огневых испытаний

Comparison of numerical experiments' results with fire test data

Table 2

| Глубина прогрева, мм | 30 мин. | | 60 мин. | | 90 мин. | | 120 мин. | | 150 мин. | | 180 мин. | |
|----------------------|---------|-------|---------|-------|---------|-------|----------|-------|----------|-------|----------|-------|
| | Расчет | Эксп. | Расчет | Эксп. | Расчет | Эксп. | Расчет | Эксп. | Расчет | Эксп. | Расчет | Эксп. |
| 0 | 613 | 600 | 790 | 790 | 883 | 870 | 946 | 930 | 993 | 970 | 1030 | 1000 |
| 40 | 146 | 130 | 282 | 280 | 383 | 370 | 431 | 440 | 525 | 500 | 579 | 560 |
| 80 | 45 | 50 | 108 | 95 | 174 | 150 | 234 | 280 | 288 | 280 | 336 | 310 |
| 120 | 24 | 32 | 47 | 45 | 83 | 80 | 122 | 100 | 160 | 150 | 196 | 180 |
| 160 | 20 | 20 | 32 | 25 | 53 | 40 | 76 | 60 | 10 | 80 | 122 | 100 |

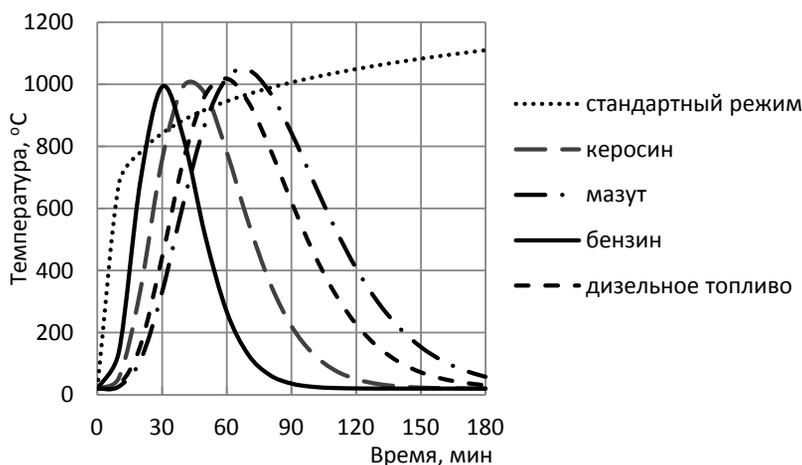


Рис. 5. Температурный режим в помещении при стандартном режиме пожара и при пожаре в резервуаре хранения нефтепродуктов ($V=10\text{ м}^3$)

Fig. 5. Temperature mode in a room in standard fire mode and in oil product storage vessel fire ($V=10\text{ м}^3$)



Рис. 6. Визуальное отображение
Fig. 6. Display image



Рис. 7. Элемент справочно-вычислительного модуля («Блок значений показателей пожарной опасности»)

Fig. 7. An example of software package (Fire danger classes)



Рис. 8. Элемент справочно-вычислительного модуля («Термофизические свойства веществ»)

Fig. 8. An example of software package (Thermophysical Properties of Substances)

от «стандартного» температурного режима (рис. 5), то в предлагаемом программном продукте необходимо использовать методику расчета среднеинтегральной температуры продуктов горения в помещении, приведенную в нормативном документе [1]. Данная методика учитывает параметры помещения и вентиляции, физико-химические свойства горючего материала и пожарную нагрузку.

Для определения температурного режима по данной методике необходимо иметь следующие параметры:

- плотность пожарной нагрузки;
- характеристики горючих материалов (скорость распространения пламени, низшая теплота сгорания, удельная массовая скорость выгорания, удельное потребление кислорода) в помещениях различных классов функциональной пожарной опасности, принятые по аналогии с экспериментальными и нормативными данными.

Такие данные приведены в отечественных и зарубежных нормативных, справочных и методических документах, а также в различной технической литературе [4–7, 9, 11–15].

Для автоматизации поиска требуемых характеристик и повышения эффективности выполняемых пожарно-тех-

нических работ необходимо использовать программный продукт, позволяющий автоматизировать процесс поиска параметров помещений и материалов.

Геометрические размеры складского помещения

Таблица 3

Table 3

Warehouses dimensions

| | |
|---|------------|
| Длина помещения, м | 16 |
| Ширина помещения, м | 12 |
| Высота помещения h , м | 3,5 |
| Толщина перекрытий, см | 18 |
| Материал перекрытий | Бетон М350 |
| Площадь 2-х окон, м^2 | 6 |
| Высота двери для персонала, см | 190 |
| Ширина двери для персонала, см | 90 |
| Высота дверного проема для производственных целей, см | 300 |
| Ширина дверного проема для производственных целей, см | 220 |

нических расчетов, был разработан справочно-вычислительный модуль, представляющий собой базу данных теплофизических свойств веществ и значений показателей пожарной опасности по типовой горючей нагрузке. На рис. 6, 7, 8 представлена визуализация отображений, порождаемых программой для ЭВМ:

С помощью предложенного программного комплекса можно спрогнозировать распределение температуры

в сечении плиты перекрытия, при возможном воздействии в реальных условиях пожара в складском помещении нефтебазы. Геометрические размеры, а также характеристики его ограждающих конструкций и пожарной нагрузки представлены в табл. 3.

Результаты расчетов по оценки огнестойкости перекрытия рассматриваемого помещения представлены в табл. 4–7.

Таблица 4

Результаты вычислений температурного поля в сечении перекрытия при пожаре бензина в резервуаре объемом $V=10 \text{ м}^3$ (7400 кг)

Table 4

Calculation results for the temperature field of gasoline fire in floor slab cross-section in a tank of the volume of $V=10 \text{ м}^3$ (7400 kg)

| Глубина прогрева, мм | Время, мин. | | | | | | | | | | | |
|----------------------|-------------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
| | 10 | 20 | 30 | 40 | 50 | 60 | 70 | 80 | 90 | 100 | 110 | 120 |
| 0 | 32 | 286 | 730 | 689 | 503 | 371 | 292 | 241 | 205 | 179 | 160 | 145 |
| 20 | 22 | 100 | 315 | 437 | 432 | 371 | 311 | 264 | 229 | 202 | 180 | 164 |
| 40 | 20 | 45 | 149 | 256 | 307 | 307 | 283 | 255 | 228 | 206 | 188 | 172 |
| 60 | 20 | 27 | 74 | 145 | 201 | 228 | 231 | 223 | 210 | 196 | 183 | 171 |
| 80 | 20 | 22 | 41 | 83 | 127 | 159 | 177 | 182 | 180 | 175 | 169 | 161 |
| 100 | 20 | 21 | 28 | 50 | 80 | 108 | 129 | 142 | 148 | 150 | 150 | 147 |
| 120 | 20 | 20 | 23 | 33 | 52 | 74 | 93 | 108 | 119 | 126 | 130 | 131 |
| 140 | 20 | 20 | 21 | 26 | 37 | 52 | 68 | 83 | 95 | 105 | 111 | 115 |
| 160 | 20 | 20 | 20 | 23 | 29 | 40 | 53 | 66 | 79 | 89 | 96 | 101 |
| 180 | 20 | 20 | 20 | 22 | 26 | 35 | 46 | 58 | 69 | 78 | 85 | 90 |

Таблица 5

Результаты вычислений температурного поля в сечении перекрытия при пожаре мазута в резервуаре объемом $V=10 \text{ м}^3$ (9700 кг)

Table 5

Calculation results for the temperature field of mazut fire in floor slab cross-section in a tank of the volume of $V=10 \text{ м}^3$ (9700 kg)

| Глубина прогрева, мм | Время, мин. | | | | | | | | | | | |
|----------------------|-------------|----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
| | 10 | 20 | 30 | 40 | 50 | 60 | 70 | 80 | 90 | 100 | 110 | 120 |
| 0 | 21 | 33 | 100 | 291 | 582 | 807 | 888 | 857 | 767 | 662 | 564 | 483 |
| 20 | 20 | 24 | 51 | 135 | 279 | 425 | 530 | 590 | 606 | 586 | 544 | 493 |
| 40 | 20 | 21 | 32 | 70 | 147 | 243 | 329 | 396 | 439 | 458 | 457 | 440 |
| 60 | 20 | 20 | 24 | 41 | 82 | 141 | 205 | 262 | 307 | 340 | 358 | 364 |
| 80 | 20 | 20 | 21 | 29 | 49 | 84 | 128 | 172 | 212 | 245 | 271 | 287 |
| 100 | 20 | 20 | 20 | 23 | 33 | 53 | 81 | 113 | 145 | 175 | 201 | 222 |
| 120 | 20 | 20 | 20 | 21 | 26 | 36 | 54 | 76 | 101 | 125 | 149 | 170 |
| 140 | 20 | 20 | 20 | 20 | 23 | 28 | 39 | 54 | 72 | 92 | 112 | 132 |
| 160 | 20 | 20 | 20 | 20 | 21 | 24 | 31 | 41 | 55 | 72 | 89 | 106 |
| 180 | 20 | 20 | 20 | 20 | 21 | 23 | 28 | 36 | 48 | 61 | 76 | 91 |

Таблица 6

Результаты вычислений температурного поля в сечении перекрытия при пожаре дизельного топлива в резервуаре объемом $V=10 \text{ м}^3$ (8500 кг)

Table 6

Calculation results for the temperature field of diesel fuel fire in floor slab cross-section in a tank of the volume of $V=10 \text{ м}^3$ (8500 kg)

| Глубина прогрева, мм | Время, мин. | | | | | | | | | | | |
|----------------------|-------------|----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
| | 10 | 20 | 30 | 40 | 50 | 60 | 70 | 80 | 90 | 100 | 110 | 120 |
| 0 | 21 | 42 | 151 | 424 | 713 | 839 | 815 | 716 | 603 | 504 | 426 | 366 |
| 20 | 20 | 27 | 70 | 191 | 351 | 478 | 548 | 565 | 541 | 494 | 441 | 392 |
| 40 | 20 | 22 | 39 | 95 | 189 | 284 | 358 | 404 | 423 | 418 | 399 | 372 |
| 60 | 20 | 21 | 27 | 53 | 105 | 169 | 230 | 278 | 311 | 328 | 331 | 325 |
| 80 | 20 | 20 | 22 | 34 | 61 | 102 | 147 | 188 | 222 | 247 | 262 | 269 |
| 100 | 20 | 20 | 21 | 25 | 39 | 64 | 94 | 127 | 156 | 182 | 201 | 215 |
| 120 | 20 | 20 | 20 | 22 | 29 | 43 | 63 | 86 | 110 | 133 | 153 | 170 |
| 140 | 20 | 20 | 20 | 21 | 24 | 31 | 44 | 61 | 80 | 100 | 118 | 135 |
| 160 | 20 | 20 | 20 | 20 | 22 | 26 | 34 | 47 | 62 | 78 | 95 | 110 |
| 180 | 20 | 20 | 20 | 20 | 21 | 24 | 31 | 40 | 53 | 67 | 82 | 95 |

Таблица 7

Результаты вычислений температурного поля в сечении перекрытия при пожаре керосина в резервуаре объемом $V=10 \text{ м}^3$ (8200 кг)

Table 7

Calculation results for the temperature field of kerosene fire in floor slab cross-section in a tank of the volume of $V=10 \text{ м}^3$ (8200 kg)

| Глубина прогрева, мм | Время, мин. | | | | | | | | | | | |
|----------------------|-------------|----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
| | 10 | 20 | 30 | 40 | 50 | 60 | 70 | 80 | 90 | 100 | 110 | 120 |
| 0 | 23 | 88 | 392 | 741 | 805 | 690 | 548 | 437 | 358 | 302 | 261 | 229 |
| 20 | 21 | 41 | 158 | 345 | 472 | 515 | 490 | 435 | 377 | 328 | 289 | 257 |
| 40 | 20 | 27 | 73 | 176 | 278 | 345 | 373 | 367 | 344 | 315 | 287 | 262 |
| 60 | 20 | 22 | 40 | 93 | 162 | 222 | 263 | 283 | 285 | 277 | 263 | 248 |
| 80 | 20 | 21 | 27 | 53 | 95 | 141 | 180 | 207 | 223 | 228 | 227 | 222 |
| 100 | 20 | 20 | 22 | 34 | 58 | 89 | 121 | 148 | 168 | 181 | 188 | 191 |
| 120 | 20 | 20 | 21 | 26 | 39 | 58 | 82 | 105 | 125 | 141 | 152 | 160 |
| 140 | 20 | 20 | 20 | 22 | 29 | 41 | 57 | 76 | 94 | 110 | 124 | 134 |
| 160 | 20 | 20 | 20 | 21 | 24 | 32 | 44 | 58 | 74 | 89 | 102 | 113 |
| 180 | 20 | 20 | 20 | 21 | 23 | 29 | 38 | 50 | 64 | 77 | 89 | 99 |



Рис. 9. Выбор режима пожара
Fig. 9. Fire mode selection

Температурный прогрев ограждающих конструкций в режиме реального пожара

| Параметры ограждающей конструкции | | Объемно-планировочные параметры помещения | | | |
|--|------------------------------------|---|--------------------------------|----------------------------------|-----------|
| Тип конструкции | Потолочное перекрытие | Геометрические параметры помещения | | | |
| Строительный материал | Бетон на известняковом заполнителе | Длина | 20 м | Ширина | 4 м |
| Свойства материала | | Высота | 3 м | Геометрические параметры проемов | |
| $\lambda = \lambda_0 + \beta \cdot t$ λ_0 1,14 β -0,00055 Толщина, мм: 60 | | Вид | | Ширина, м | Высота, м |
| $c = c_0 + \beta_c \cdot t$ c_0 0,71 β_c 0,00083 Плотность, кг/м ³ : 2350 | | Оконные | | 2 | 1 |
| Температура окружающей среды: 25,0 °C | | Дверные | | 2 | 1 |
| Параметры пожарной нагрузки | | | | | |
| Горючая жидкость | | | Этиловый спирт | | |
| Масса, кг | 4000 | Чис. Млж/кг | 27,20 | М, кг/(м ² ·с) | 0,031 |
| [Условие: 0,2 ≤ Δt < 7,67 сек.] | | V _н , м ³ /кг | | 6,69 | |
| Конечно-разностная схема решения задачи | | | | | |
| Расчетный шаг по времени Δt | | 1,0 сек. | Расчетный шаг по координате Δx | | 4,0 мм |
| Вывод результатов расчета через 30 мин. в 6 интервалах времени для 8 точек по координате | | | | | |
| Расчет | | | | | |

Рис. 10. Исходные данные
Fig. 10. Initial data

Температурный прогрев ограждающих конструкций в режиме реального пожара

| Тип конструкции | | Потолочное перекрытие | | | | | | |
|-----------------------|------------------------|---|---|-----------|-----|------|-----|--|
| Строительный материал | | Бетон на известняковом заполнителе | | | | | | |
| Толщина, мм | | 100,0 | | | | | | |
| Время, мин. | Т-ра греющей среды, °C | Коэффициент теплообмена со стороны гр.среды, Вт/(м ² ·K) | Расстояние от нагреваемой поверхности, мм | | | | | Коэффициент теплообмена со стороны окр.среды, Вт/(м ² ·K) |
| | | | 0 | 20 | 40 | 60 | 80 | |
| 0 | 25 | | 25 | 25 | 25 | 25 | 25 | 25 |
| 30 | 347 | 18 | 93 | 43 | 30 | 26 | 25 | 15 |
| 60 | 881 | 62 | 597 | 285 | 141 | 75 | 46 | 16 |
| 90 | 605 | 33 | 504 | 392 | 266 | 173 | 116 | 16 |
| 120 | 249 | 14 | 326 | 323 | 276 | 218 | 167 | 17 |
| 150 | 89 | 10 | 239 | 253 | 241 | 213 | 177 | 17 |
| 180 | 40 | 9 | 190 | 207 | 206 | 191 | 166 | 17 |
| Горючая жидкость | | Мазут | | Масса, кг | | 4000 | | |

Рис. 11. Результаты расчета
Fig. 11. Calculation results

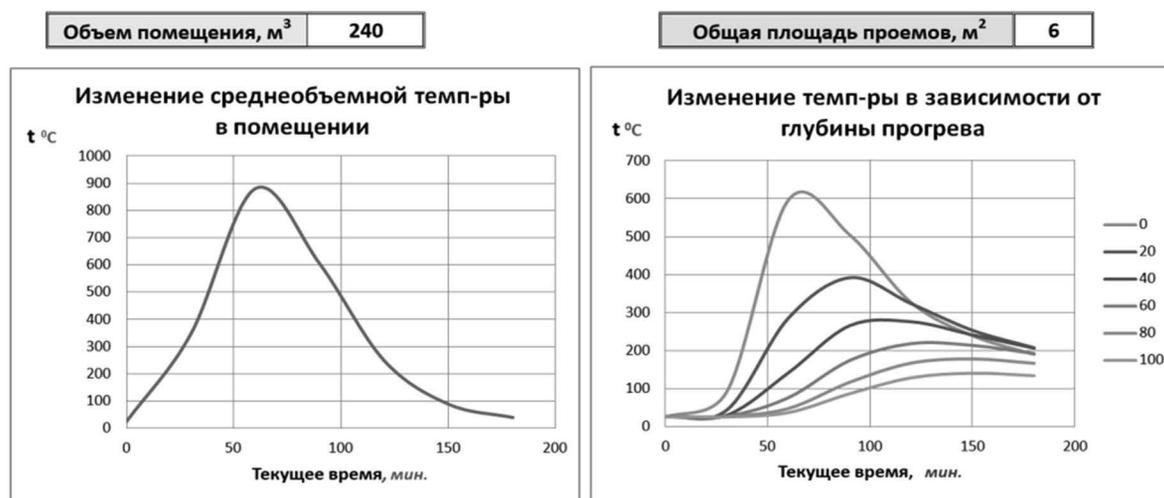


Рис. 12. Графическое представление результатов расчета
 Fig. 12. Graphic representation of calculation results

На рис. 9–12 представлена визуализация отображений, порождаемых программой для ЭВМ:

Выводы

Результатом проведенного исследования явились автоматизация и оптимизация расчета изменения температуры продуктов горения в помещении и параметров температурного поля в сечении перекрытия объекта нефтегазового комплекса при пожаре в помещениях с раз-

личной пожарной нагрузкой (горючими жидкостями), для оценки влияния различных температурных режимов на огнестойкость строительных конструкций.

Практическое использование данного программного модуля упрощает и ускоряет возможности практического использования в профессиональной сфере для прогнозирования поведения несущих конструкций в условиях реального пожара, выбора материала и типа конструкций.

Литература

References

- ГОСТ Р 12.3.047–98. Пожарная безопасность технологических процессов. Общие требования. Методы контроля. М.: Госстандарт России, 1998. 84 с.
- Федеральный закон № 123-ФЗ «Технический регламент о требованиях пожарной безопасности» от 22.07.2008 г.
- Абросимов Ю. Г. Кошмаров Ю. А., Юн С. П. Моделирование температурного режима пожара в помещении // Пожарная опасность технологических процессов, зданий, сооружений и профилактика пожаров. Сборник научных трудов. М.: Изд-во ВИПТШ МВД СССР. 1988. с. 130–135.
- Дринберг А. С., Гравит М. В., Зыбина О. А. Огнезащита конструкций интумесцентными лакокрасочными материалами при углеводородном режиме пожара // Лакокрасочные материалы и их применение. 2018. № 1–2. С. 44–49.
- Гравит М. В., Недрышкин О. В., Вайтицкий А. А., Шпакова А. М., Нигматуллина Д. Г. Пожарно-технические характеристики строительных материалов в европейских и российских нормативных документах. Проблемы гармонизации методов исследования и классификации // Пожаровзрывобезопасность. 2016. Т. 25. № 10. С. 16–29.
- Страхов В. Л., Крутов А. М., Давыдкин Н. Ф. Огнезащита строительных конструкций / под ред. Ю. А. Кошмарова. М.: Информационно-издательский центр «ТИМР», 2000. 433 с.
- Пожнин А. П., Шиняева Т. Б. Огнезащитные покрытия для металлических конструкций на основе минерального сырья // Труды ЛИСИ (Строительные материалы и изделия из техногенного сырья). Л.: ЛИСИ, 1991. 25 с.
- State standard R 12.3.047–98. Fire safety of technological processes. General requirements. Methods of control. Moscow: Gosstandart of Russia, 1998. 84 p. (in Russian)
- Federal Law No. 123-FZ «Technical Regulations on Fire Safety Requirements» of 22.07.2008. (in Russian)
- Abrosimov Yu. G. Koshmarov Yu. A., Yun S. P. Modeling of the temperature regime of a fire in a room. Fire hazard of technological processes, buildings, structures and fire prevention. Collection of scientific works. Moscow: Publishing House of the VIPTSH of the Ministry of Internal Affairs of the USSR. 1988. pp. 130–135. (in Russian)
- Drinberg A. S., Gravit M. V., Zybina O. A. Fire protection of structures with intumescent paint and varnish materials in the hydrocarbon fire regime. *Paint and varnish materials and their application*. 2018. No. 1–2. pp. 44–49. (in Russian)
- Gravit M. V., Nedryshkin O. V., Vaititsky A. A., Shpakova A. M., Nigmatullina D. G. Fire-technical characteristics of building materials in European and Russian regulatory documents. Problems of harmonization of research methods and classification. *Fire and explosion safety*. 2016. Vol. 25. No. 10. P. 16–29. (in Russian)
- Strakhov V. L., Krutov A. M., Davydkin N. F. Fire protection of building structures. Moscow: Information and Publishing Center «TIMR», 2000, 433 p. (in Russian)
- Pozhnin A. P., Shinyayeva T. B. Fire-resistant coatings for metal structures based on mineral raw materials. *Trudy LISI (Construction materials and products from technogenic raw materials)*. L.: LISI, 1991. 25 p. (in Russian)

8. Зайцев А. М., Бологов В. А. Численное моделирование прогрева строительных конструкций для определения коэффициента теплоотдачи при пожарах // Вестник воронежского института ГПСМЧС России. 2015. № 1. с. 19–26.
9. Еналеев Р. Ш. Огнестойкость элементов конструкций при пожарах на предприятиях нефтегазового комплекса / Р. Ш. Еналеев, Э. Ш. Теляков, О. А. Тучкова, Л. Э. Осипова // Известия ВУЗов. Проблемы энергетики. 2010. № 11–12. С. 23–34.
10. Пашковский П. С. Математическая модель тепломассообменных процессов при пожаре в здании / П. С. Пашковский, И. Н. Зинченко, А. М. Богомаз // Научный вестник НИИГД «Респиратор». 2015. № 52. С. 51–59.
11. Заикин С. В., Страхов В. Л., Карпов В. Л. Огневые испытания огнезащиты для технологического оборудования объектов добычи, переработки, транспортировки и хранения нефти и газа // Материалы МНПК: Актуальные проблемы пожарной безопасности. М.: ВНИИПО МЧС России, 2008. Ч. 1. С. 210–214.
12. Abdrakhimov V., Abdrakhimova E., Semenychev V. Study of heat and mass transfer during firing of heat insulation objects based on burntrocks and beidellite clay. *Refractories and Industrial Ceramics*, 1 July 2011. Vol. 52, No. 2. Pp. 133–135, doi:10.1007/s11148-011-9381-2
13. Andrej Horvat, Yehuda Sinai & Piotr Tofilo (2009) Semi-Analytical Treatment of Wall Heat Transfer Coupled to a Numerical Simulation Model of Fire // *Numerical Heat Transfer, Part A: Applications*, 55:6,517–533, DOI: 10.1080/10407780902821128
14. John H. Lienhard IV, John H. Lienhard V. *A heat transfer text book*. — 3rd ed. Cambridge, MA: Phlogiston Press, 2008.
15. Novozhilov V. Non-Linear Dynamical Model of Compartment Fire Flashover // *Journal of Engineering Mathematics*. 2010. Vol. 67, No 4. P. 387–400.
16. Roitman V. M. Fire testing of Building Materials in View of the Moisture Factor. First European Symposium of Fire Safety Science (Abstracts). Zurich. ETH. 1995. P. 135–136.
8. Zaitsev A. M., Bologov V. A. Numerical simulation of heating of building structures for determining the heat transfer coefficient in fires. *Bulletin of the Voronezh Institute HPSCS Russia*. 2015. No. 1. p. 19–26.
9. Enaleev R. Sh. Fire resistance of structural elements during fires at oil and gas complex enterprises / R. Sh. Enaleev, E. Sh. Telyakov, O. A. Tuchkova, L. E. Osipova. *Izvestiya VUZov. Energy problems*. 2010. No 11–12. Pp. 23–34. (in Russian)
10. Pashkovsky P. S., Zinchenko I. N., Bogomaz A. M., Mathematical model of heat and mass transfer processes in a building fire. *Scientific Bulletin of the NIIGD «Respirator»*. 2015. No. 52. pp. 51–59. (in Russian)
11. Zaikin S. V., Strakhov V. L., Karpov V. L. Fire tests of fire protection for technological equipment of oil and gas production, processing, transportation and storage facilities. *MNPC materials: Actual problems of fire safety*. Moscow: VNIPO EMERCOM of Russia, 2008. Ch. 1. pp. 210–214. (in Russian)
12. Abdrakhimov V., Abdrakhimova E., Semenychev V. Study of heat and mass transfer during firing of heat insulation objects based on burntrocks and beidellite clay. *Refractories and Industrial Ceramics*, Vol. 52, No. 2. (1 July 2011), Pp. 133–135, doi:10.1007/s11148-011-9381-2
13. Andrej Horvat, Yehuda Sinai & Piotr Tofilo (2009) Semi-Analytical Treatment of Wall Heat Transfer Coupled to a Numerical Simulation Model of Fire, *Numerical Heat Transfer, Part A: Applications*, 55:6,517–533, DOI: 10.1080/10407780902821128
14. John H. Lienhard IV, John H. Lienhard V. *A heat transfer text book*. -3rd ed. Cambridge, MA: Phlogiston Press, 2008.
15. Novozhilov V. Non-Linear Dynamical Model of Compartment Fire Flashover. *Journal of Engineering Mathematics*. 2010. Vol. 67, No 4. P. 387–400.
16. Roitman V. M. Fire testing of Building Materials in View of the Moisture Factor. First European Symposium of Fire Safety Science (Abstracts). Zurich. ETH. 1995. P. 135–136.

Сведения об авторах

Романов Николай Николаевич

К. т. н., доцент Санкт-Петербургского университета государственной противопожарной службы МЧС России, 191245, Санкт-Петербург, Московский пр. 149, nik57nik@mail.ru, ORCID ID 0000-0001-8254-9424

Кузьмин Анатолий Алексеевич

К. п. н., доцент Санкт-Петербургского университета государственной противопожарной службы МЧС России, 191245, Санкт-Петербург, Московский пр. 149, kaa47@mail.ru, ORCID ID 0000-0003-0301-0696

Пермяков Алексей Александрович

К. п. н., Санкт-Петербургский университет государственной противопожарной службы, 191245 Санкт-Петербург, Московский пр. 149, jouker2005@yandex.ru, ORCID ID 0000-0002-2081-6934

Information about authors

Romanov Nikolay N.

Ph. D., Associate Professor of the St. Petersburg University of State Fire Service of Emercom of Russia, Russia, 191245, St. Petersburg, Moskovsky Pr. 149, nik57nik@mail.ru, ORCID ID 0000-0001-8254-9424

Kuzmin Anatoly A.

Ph. D., Associate Professor of the St. Petersburg University of State Fire Service of Emercom of Russia, Russia, 191245, St. Petersburg, Moskovsky Pr. 149, kaa47@mail.ru, ORCID ID 0000-0003-0301-0696

Permyakov Alexey A.

Ph. D., St. Petersburg University of State Fire Service of Emercom of Russia, Russia, 191245, St. Petersburg, Moskovsky Pr. 149, jouker2005@yandex.ru, ORCID ID 0000-0002-2081-6934

Федоров Александр Валентинович

Д. т. н., доцент факультета биотехнологий
Университета ИТМО, 191002, Санкт-Петербург,
ул. Ломоносова, 9, afedorov@itmo.ru,
ORCID ID 0000-0003-0030-3848

Fedorov Alexander V.

D. Sc., Associate Professor of the Faculty of Biotechnology
of ITMO University, Russia, 191002, St. Petersburg,
Lomonosova St. 9, afedorov@itmo.ru,
ORCID ID 0000-0003-0030-3848

Симонова Марина Александровна

К. т. н., доцент, доцент Высшей школы техносферной
безопасности Инженерно-строительного института, Санкт-
Петербургский политехнический университет Петра
Великого, 195251, Санкт-Петербург, Политехническая ул., 29,
masima82@inbox.ru, ORCID ID 0000-0003-2716-0349

Simonova Marina A.

Ph. D., Associate Professor, Associate Professor of the Higher
school of technosphere safety of the Institute of civil Engineering,
Peter the Great Saint Petersburg Polytechnic University, Russia,
195251, St. Petersburg, Politechnicheskaya St. 29,
masima82@inbox.ru, ORCID ID 0000-0003-2716-0349

III МЕЖДУНАРОДНАЯ КОНФЕРЕНЦИЯ «ЭНЕРГО-РЕСУРСОЭФФЕКТИВНОСТЬ SEWAN-2021 В ИНТЕРЕСАХ УСТОЙЧИВОГО РАЗВИТИЯ»

<https://www.sewanconf.ru>



19-24 апреля 2021 г, Санкт-Петербург

Университет ИТМО, совместно с Томским политехническим университетом и Международной академией холода, приглашает принять участие в III Международной научной конференции «Энерго-ресурсоэффективность в интересах устойчивого развития».

Конференция состоится в Санкт-Петербурге на базе Университета ИТМО 19-24 апреля 2021 г.

Научная программа конференции:

- Энергосбережение и повышение энергетической эффективности
- Экоэнергетика
- Проблемы экологической безопасности и системы защиты среды обитания
- Чистые технологии
- Чистая вода
- Рациональное природопользование
- Устойчивые холодильные цепи
- Пищевые биотехнологии для здоровья человека

Участниками конференции являются представители из 13 стран мира (Чешская Республика, Хорватия, Словения, Новая Зеландия, Малайзия, Иран и т.д.), а также из регионов РФ. По результатам конференции будут опубликованы тезисы докладов в сборнике РИНЦ, выпущен сборник Scopus, опубликованы статьи в журналах ВАК и Q1.

Сайт конференции:

<https://www.sewanconf.ru>