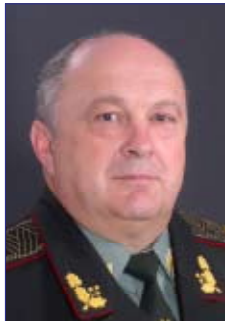




Alexandr S. Rashkovskiy
Рашковский
Александр
Саулович



Sergey A. Rashkovskiy
Рашковский
Сергей
Александрович



Nikolay I. Postupalskiy
Поступальский
Николай
Иванович



Dmitriy V. Ermakov
Ермаков
Дмитрий
Владиславович

УДК 614.84:629.5.081.3
М 74

SIMULATION OF FIRE DEVELOPMENT AND DISTRIBUTION IN FLOATING DOCK TOWERS

**МОДЕЛИРОВАНИЕ РАЗВИТИЯ
И РАСПРОСТРАНЕНИЯ ПОЖАРА В БАШНЯХ ПЛАВУЧЕГО ДОКА**

DOI 10.1004/978-2-321-97836-3

Alexandr S. Rashkovskiy А. С. Рашковский, д-р техн. наук, проф.¹
olexandr.rashkovskiy@nuos.edu.ua
ORC ID: 0000-0002-3730-3748

Sergey A. Rashkovskiy С. А. Рашковский, д-р физ.-мат. наук, проф.²
rash@hotmail.ru
ORC ID: 0000-0001-5683-5988

Nikolay I. Postupalskiy Н. И. Поступальский, инж.³
pni5544@gmail.com
ORC ID: 0000-0003-3825-8392

Dmitriy V. Ermakov Д. В. Ермаков, инж.⁴
office@pallada.ks.ua
ORC ID: 0000-0002-7759-8819

¹*Admiral Makarov National University of Shipbuilding, Nikolaev*

¹*Национальный университет кораблестроения имени адмирала Макарова, г. Николаев*

²*Institute for Problems in Mechanics of RAS, Moscow*

²*Институт проблем механики РАН, г. Москва*

³*Emergency Service of Ukraine, Nikolaev*

³*Служба чрезвычайных ситуаций МО Украины, г. Николаев*

⁴*Kherson State Plant "Pallada", Kherson*

⁴*Херсонский государственный завод «Паллада», г. Херсон*

Abstract. One of the most difficult problems which appear during the floating docks design is the fire hazard estimation. For each designed floating dock it is necessary to analyze the possible scenarios of fire development, the ways of its distribution and work out structural, technical and organizational events for the prevention, localization and suppression of possible fires. The support in such analysis may provide computer simulation of fire development scenarios: it is possible to trace the ways of fire distribution into the dock tower taking into account the work of fire suppressing resources setting in different places the preliminary focuses of ignition fires.

The mathematic model of fire development and distribution in the floating dock tower has been developed and researched taking into account the potential fire wire which connected the rooms. This model allows counting the possible scenarios and limited modes of fire development and evaluating the fire hazards of structures with different complexity. The parametrical research of fire development in the room system has been carried out. It is demonstrated that there are a conditions in which the fire distribution can be stopped and the criteria of fire cease are determined.

Keywords: floating dock, fire danger, fire development, fire spread, the combustion process, the modeling of fire.

Аннотация. Предложена математическая модель развития и распространения пожара в башнях плавучего дока. Показано, что существуют условия, при которых распространение пожара может остановиться, и определены критерии прекращения пожара. Модель может быть применена для других плавучих сооружений различной сложности.

Ключевые слова: плавучий док, пожарная опасность, развитие пожара, распространение пожара, процесс горения, моделирование пожара.

Анотація. Запропоновано математичну модель розвитку та розповсюдження пожежі в баштах плавучого дока. Показано, що існують умови, при яких розповсюдження пожежі може зупинитися, та визначені критерії припинення пожежі. Модель може бути застосовано для інших плавучих споруд різної складності.

Ключові слова: плавучий док, пожежна небезпека, розвиток пожежі, розповсюдження пожежі, процес згоряння, моделювання пожежі.

References

Brushlinskiy N.N., Korolchenko A.Ya. *Modelirovanie pozharov i vzryvov* [Fires and Explosions Simulation]. Moscow, Pozhnaika Publ., 2000.

Rashkovskiy A. S., Rashkovskiy S.A., Postupalskiy N.I. et al. *Osnovy sovershenstvovaniya pozharnoy bezopasnosti v sudostroenii* [Fundamentals of Fire Safety Improvement in Shipbuilding]. Nikolaev, NUS Publ., 2007.

Rashkovskiy A. S., Slutskiy N.H., Shchedrolosev A.V. et al. *Proektirovanie, tekhnologiya i organizatsiya stroitelstva kompozitnykh plavuchykh dokov bolshoy podemnoy sily* [Design, Technology and Organization of Construction of Composite Floating Docks with High Buoyant Power]. Nikolaev, RAL-polihrafiya Publ., 2008.

Rashkovskiy S. A. *Setevye modeli rasprostraneniya pozhara v zdaniyakh i na sudakh* [Network Model of the Fire Spread in Buildings and Ships], *Zbirnyk naukovykh prac Natsionalnoho univesitetu korablebuduvannia — The Collection of Scientific Publications of NUS*, 2005, no. 5 (404), pp. 163–168.

Rashkovskiy S. A., Postupalskiy N. I. *Teplovaya model rasprostraneniya pozhara v zdaniyakh i na sudakh* [Thermal Model of the Fire Spread in Buildings and Ships], *Zbirnyk naukovykh prac Natsionalnoho univesitetu korablebuduvannia — The Collection of Scientific Publications of NUS*, 2006, no. 1 (406), pp. 44–53.

Problem statement. One of the difficult problems which arise during floating docks designing is the assessment of their fire hazard. For each of the designed dock the possible scenarios and ways of the fire distribution have to be analyzed, constructive, technical and organizational measures for prevention, localization and fighting of possible fires have to be designed. Computer simulation of the fire development scenarios can provide help in this analysis: setting initial points of ignition at various locations ways of the fire distribution on the dock tower can be traced due to the fire fighting equipment operation. To create such software systems efficient mathematical models and algorithms are required which enable to calculate a large number of possible scenarios of the fire development in a reasonable time.

The current models of fire development in the premises are based on the three-dimensional time-dependent calculations which take into account the gas-dynamic and thermal characteristics of the various fire sources combustion [1–3]. Such calculations, even for a single premise, require large computational resources and can last for several hours, and for this reason they are performed primarily on supercomputers and for single isolated premises; the calculation of the fire distribution in building which contains even several premises within the limits of the three-dimensional time-dependent models is currently very problematic.

The article aim is to develop a mathematical model of fire development and distribution processes in the floating dock towers and other floating structures of varying complexity.

Basic material. From the point of view of fire hazard any floating dock tower can be considered as a system of premises, connected by the potential fire conductors — structural elements whereby the fire can go from a burning building into a not yet burning one. The fire conductors may be represented with

Постановка проблемы. Одной из сложных проблем, возникающих при проектировании плавучих доков, является оценка их пожарной опасности. Для каждого проектируемого дока необходимо проанализировать возможные сценарии развития пожаров, пути их распространения и разработать конструктивные, технические и организационные мероприятия по предотвращению, локализации и тушению возможных пожаров. Помощь в таком анализе может оказать компьютерное моделирование сценариев развития пожаров: задавая в различных местах первоначальные очаги воспламенения, можно проследить пути распространения пожара по башне дока с учетом работы средств пожаротушения. Для создания таких программных комплексов необходимы эффективные математические модели и алгоритмы, позволяющие рассчитывать большое число возможных сценариев развития пожара за приемлемое время.

Существующие в настоящее время модели развития пожара в помещениях основаны на трехмерных нестационарных расчетах, учитывающих газодинамические и теплофизические особенности процесса горения различных источников пожара [1, 4, 5]. Такие расчеты даже для одного помещения требуют больших вычислительных ресурсов и могут длиться несколько часов, поэтому они выполняются преимущественно на суперкомпьютерах и для одиночных изолированных помещений; расчет процесса распространения пожара по зданию, содержащему несколько помещений, в рамках трехмерных нестационарных моделей в настоящее время весьма проблематичен.

ЦЕЛЬЮ СТАТЬИ является разработка математической модели процесса развития и распространения пожара в башнях плавучего дока и на других плавучих сооружениях различной сложности.

common bulkheads and recesses of premises, ventilation and elevator shafts, power transmission lines, corridors, and many other structural elements of the dock tower where combustion, a smoldering heat wave from the fire area or the flow of hot gases can be distributed. Two premises may be connected simultaneously with several potential fire conductors, and the fire transfer from one premise to another can occur at any one of these conductors depending on the encountered conditions.

From the practical experience it is seen that the fire distribution from one premise into another one comes not always along the shortest path; for instance, some cases are known when the fire distributed from the initial point not up the floating structures, but down and got to the upper decks through the lower ones.

Abstracting from the actual design, from the point of view of the possible fire distribution, the floating dock tower can be represented as a graph whose vertices are the premises, and ribs are the potential fire conductors which connect the various premises. The vertices of the graph and thus the premises in the building indexes are assigned as $i = 1, 2, \dots; j = 1, 2, \dots$; the ribs of the graph which connect i and j vertices, are described by a couple of indices $(ij)_m$, where the sub-index $m = 1, 2, \dots$ takes into account that some couples of vertices of the graph can be connected with several ribs simultaneously (the relevant premises are connected simultaneously by multiple fire conductors).

To simulate fire development and spread on the dock tower or another floating structure network and thermal models can be used [2, 3].

Each potential fire conductor $(ij)_m$ is characterized by the time of the fire transmission $\tau_{ij,m}$. If the fire occurs in the i premise, then during $\tau_{ij,m}$ time it shall come into the j premise along the $(ij)_m$ conductor. Let's consider that in the general case $\tau_{ij,m} \neq \tau_{ji,m}$. Among all the fire conductors which connect i and j premises, it is at least one for which $\tau_{ij,m}$ is minimal: $\tau_{ij} = \min_m \tau_{ij,m}$; it is the first to conduct fire from the i premise to the j premise. Obviously, only the conductors with a minimum $\tau_{ij,m}$ transmission time for a given couple (ij) should be taken into account in the calculations; others can be omitted. It allows simplifying the design scheme and assuming that each couple of vertices of the graph is connected by only one edge, characterized by the τ_{ij} time of the fire transmission.

Fire shall spread in the dock tower when the temperature in the premise with $i = 1$ number at some point of time reaches the θ_{ign} ignition temperature. This is possible only if the steady-state temperature is $\theta_1 \leq \theta_{ign}$. Otherwise, the steady-state temperature distribution shall be in the building and the ignition of the next premise shall not happen (the fire shall stop).

Thus, fire shall spread in the premises chain when the ignition temperature satisfies the following condition

Изложение основного материала. С точки зрения пожарной опасности любую башню плавучего дока можно рассматривать как систему помещений, соединенных между собой потенциальными проводниками пожара — элементами конструкций, по которым пожар может переходить из горящих помещений в еще не горящие. Проводниками пожара могут служить смежные переборки и выгородки помещений, вентиляционные и лифтовые шахты, линии электропроводки, коридоры и многие другие элементы конструкций башни дока, по которым могут распространяться горение, тление, тепловая волна от горящего помещения или поток горячих газов. Два помещения могут быть связаны одновременно несколькими потенциальными проводниками пожара, и передача пожара от одного помещения к другому может происходить по любому из этих проводников в зависимости от возникших условий.

Из практики известно, что распространение пожара от одного помещения к другому не всегда происходит по кратчайшему пути; известны, например, случаи, когда пожар от первоначального очага распространялся не вверх по плавучему сооружению, а вниз и переходил на верхние палубы через нижние.

Отвлекаясь от реальной конструкции, башню плавучего дока, с точки зрения возможного распространения пожара, можно представить в виде графа, вершинами которого являются помещения, а ребрами — потенциальные проводники пожара, связывающие различные помещения. Вершинам графа и, соответственно, помещениям в здании присваиваются индексы $i = 1, 2, \dots; j = 1, 2, \dots$; ребра графа, связывающие вершины i и j , описываются парой индексов $(ij)_m$, где нижний индекс $m = 1, 2, \dots$ учитывает, что некоторые пары вершин графа могут быть соединены одновременно несколькими ребрами (соответствующие помещения связаны одновременно несколькими проводниками пожара).

Для моделирования развития и распространения пожара по башне дока или другого плавучего сооружения могут быть использованы сетевые и тепловые модели [4, 5].

Каждый потенциальный проводник пожара $(ij)_m$ характеризуется временем передачи пожара $\tau_{ij,m}$. Если в помещении i возникнет пожар, то за время $\tau_{ij,m}$ он перейдет в помещение j по проводнику $(ij)_m$. Отметим, что в общем случае $\tau_{ij,m} \neq \tau_{ji,m}$. Среди всех проводников пожара, связывающих помещения i и j , существует, по крайней мере, один, для которого $\tau_{ij,m}$ минимально: $\tau_{ij} = \min_m \tau_{ij,m}$; именно он первым передаст пожар от помещения i к помещению j . Очевидно, в расчетах следует учитывать только проводники с минимальным для данной пары (ij) временем передачи $\tau_{ij,m}$, остальные можно отбросить. Это позволяет

$$\theta_{ign} < (\theta_{ign})_{пред} \tag{1}$$

where
$$(\theta_{ign})_{пред} = \frac{2 + \varepsilon}{2} - \sqrt{\left(\frac{2 + \varepsilon}{2}\right)^2 - 1} \tag{2}$$

The relation $(\theta_{ign})_{пред} = f(\varepsilon)$ is shown in Fig.1, (line 1) [4]. The physical meaning of (1), (2) inequalities is obvious: with the ignition temperature of premises being the temperature in the premises shall take the steady-state level (3) which is below the ignition temperature, and shall remain at it for the unrestricted period; as the result, the ignition of the next premise shall not happen. It should be noted that a steady-state temperature distribution exists only when $\varepsilon \neq 0$, i.e. when there is the heat exchange with the environment (3). There is no steady-state temperature distribution for the adiabatic fire ($\varepsilon = 0$) as well as the ignition temperature restrictions:

$$\theta_i = \left[\frac{2 + \varepsilon}{2} - \sqrt{\left(\frac{2 + \varepsilon}{2}\right)^2 - 1} \right]^i \tag{3}$$

The analysis of calculations results of the fire distribution through the chain of premises for the model with

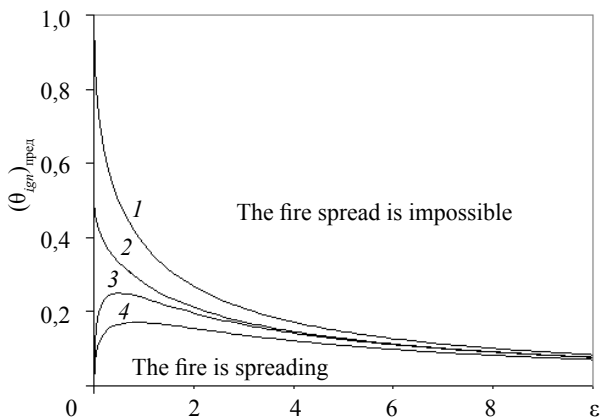


Fig. 1. Relation between the ignition limit temperature of premises and the ε parameter.

Рис. 1. Зависимости предельной температуры воспламенения помещений от параметра ε :

1 — the model with the constant fire temperature; the model with the constant velocity of energy density ($\gamma > 1$) / модель с постоянной температурой пожара; модели с постоянной скоростью энерговыделения ($\gamma >> 1$); 2 — the infinite chain of premises, the fire in the premises with the numbers $i \leq 0$ / бесконечная цепочка помещений, пожар в помещениях с номерами $i \leq 0$; 3 — semi-infinite chain with an adiabatic boundary condition, the fire in the premise $i = 0$ / полубесконечная цепочка с адиабатическим граничным условием, пожар в помещении $i = 0$; 4 — the infinite chain of premises, the fire in the premise $i = 0$ / бесконечная цепочка помещений, пожар в помещении $i = 0$.

The fire is spreading — пожар распространяется; The fire spread is impossible — распространение пожара невозможно

упростить расчетную схему и считать, что каждая пара вершин графа связана только одним ребром, характеризуемым временем передачи пожара τ_{ij} .

Для того чтобы в башне дока распространялся пожар, температура в помещении с номером $i = 1$ в некоторый момент времени должна достигнуть температуры воспламенения θ_{ign} . Это возможно только в том случае, если стационарная температура $\theta_1 \leq \theta_{ign}$. В противном случае в здании установится стационарное распределение температуры и возгорания следующего помещения не произойдет (пожар остановится).

Таким образом, чтобы по цепочке помещений распространялся пожар, температура воспламенения помещений должна удовлетворять условию

$$\theta_{ign} < (\theta_{ign})_{пред} \tag{1}$$

где
$$(\theta_{ign})_{пред} = \frac{2 + \varepsilon}{2} - \sqrt{\left(\frac{2 + \varepsilon}{2}\right)^2 - 1} \tag{2}$$

Зависимость $(\theta_{ign})_{пред} = f(\varepsilon)$ показана на рис. 1 линией 1 [4]. Физический смысл неравенства (1) очевиден: при температуре воспламенения помещений температура в помещениях выйдет на стационарный уровень (3), который ниже температуры воспламенения, и будет оставаться на нем неограниченно долго; в результате возгорание следующего помещения не произойдет. Следует отметить, что стационарное распределение температуры существует только при $\varepsilon \neq 0$, т. е. при наличии теплообмена с окружающей средой (3). Для адиабатического пожара ($\varepsilon = 0$) стационарного распределения температуры не существует, как и ограничений по температуре воспламенения:

$$\theta_i = \left[\frac{2 + \varepsilon}{2} - \sqrt{\left(\frac{2 + \varepsilon}{2}\right)^2 - 1} \right]^i \tag{3}$$

Анализ результатов серии расчетов процесса распространения пожара по цепочке помещений для модели с постоянной температурой пожара показывает, что процесс распространения такого пожара является устойчивым и либо всегда выходит на стационарный уровень, соответствующий одинаковой для всех помещений скорости распространения ω , либо прекращается и в здании устанавливается стационарное распределение температуры (3); никаких нестационарных (колебательных) режимов в модели с постоянной температурой пожара не существует.

Рассмотрим бесконечную цепочку помещений, в которой пожар охватил помещения с номерами $i \leq i_*$, где i_* — номер последнего воспламенившегося помещения; в остальных помещениях температура не достигла температуры воспламенения.

a constant fire temperature shows that such fire distribution is stable and either always reaches a steady-state level corresponding to the same distribution velocity for all premises, or the fire stops and there is the steady-state distribution temperature in the building (3); no time-dependent (oscillatory) modes exist in the model with a constant fire temperature.

Let's consider the infinite chain of premises where the fire is in the premises with numbers $i \leq i_*$ where i_* is the number of the last ignited premise; in other premises the temperature has not reach the ignition temperature. As all the premises are considered to be the same, the numeration can start with any of them; so without loss of generality, we assume $i_* = 0$.

Thus, for $i > 0$ the steady-state temperature distribution is described by the equation

$$\theta_{i-1} - (2 + \varepsilon)\theta_i + \theta_{i+1} = 0, \quad (4)$$

and for $i \leq 0$ — by the equation

$$\theta_{i-1} - (2 + \varepsilon)\theta_i + \theta_{i+1} + \varepsilon = 0. \quad (5)$$

The solution of the (4) equation shall be sought in the form $\theta_i = \theta_1 a^{i-1}$, where a is the infinite parameter. Substituting this solution into the (4) equation for $i = 2, 3, \dots$, it is easy to see that the a parameter satisfies the steady-state temperature distribution for the premises with numbers $i = 1, 2, \dots$, described by the relation

$$\theta_i = \theta_1 \left[\frac{2 + \varepsilon}{2} - \sqrt{\left(\frac{2 + \varepsilon}{2}\right)^2 - 1} \right]^{i-1} \quad (6)$$

with yet undefined θ parameter.

Taking into account that the natural condition $\lim_{i \rightarrow -\infty} \theta_i = 1$ should be valid for the long-ignited premises, then the solution $b > 1$ of the two solutions of this equation should be left, i.e.

$$b = \frac{2 + \varepsilon}{2} + \sqrt{\left(\frac{2 + \varepsilon}{2}\right)^2 - 1} = \frac{1}{a}.$$

The steady-state temperature distribution for the premises with the numbers $i = \dots, -2; -1; 0$ can be described with the relation

$$\theta_i = 1 + (\theta_0 - 1) \left[\frac{2 + \varepsilon}{2} + \sqrt{\left(\frac{2 + \varepsilon}{2}\right)^2 - 1} \right]^i \quad (7)$$

with yet undefined θ_0 parameter.

For $i = 1$ the equation (4) becomes

$$\theta_0 - (2 + \varepsilon)\theta_1 + \theta_2 = 0.$$

For $i = 0$ the equation (5) becomes

$$\theta_{-1} - (2 + \varepsilon)\theta_0 + \theta_1 + \varepsilon = 0. \quad (8)$$

Substituting the relations (6) and (7) into these equations, we obtain the system of equations:

Так как все помещения считаются одинаковыми, нумерацию можно начать с любого из них; поэтому, не теряя общности, будем считать $i_* = 0$.

Таким образом, для $i > 0$ стационарное распределение температуры описывается уравнением

$$\theta_{i-1} - (2 + \varepsilon)\theta_i + \theta_{i+1} = 0, \quad (4)$$

а для $i \leq 0$ — уравнением

$$\theta_{i-1} - (2 + \varepsilon)\theta_i + \theta_{i+1} + \varepsilon = 0. \quad (5)$$

Решение уравнения (4) будем искать в виде $\theta_i = \theta_1 a^{i-1}$, где a — безразмерный параметр. Подставляя это решение в уравнение (4) для $i = 2, 3, \dots$, легко убедиться, что параметр a удовлетворяет стационарному распределению температуры для помещений с номерами $i = 1, 2, \dots$, описываемому зависимостью

$$\theta_i = \theta_1 \left[\frac{2 + \varepsilon}{2} - \sqrt{\left(\frac{2 + \varepsilon}{2}\right)^2 - 1} \right]^{i-1} \quad (6)$$

с неопределенным пока параметром θ .

Учитывая, что для давно воспламенившихся помещений должно выполняться естественное условие $\lim_{i \rightarrow -\infty} \theta_i = 1$, из двух решений этого уравнения необходимо оставить $b > 1$, т. е.

$$b = \frac{2 + \varepsilon}{2} + \sqrt{\left(\frac{2 + \varepsilon}{2}\right)^2 - 1} = \frac{1}{a}.$$

Стационарное распределение температуры для помещений с номерами $i = \dots, -2; -1; 0$ может быть описано зависимостью

$$\theta_i = 1 + (\theta_0 - 1) \left[\frac{2 + \varepsilon}{2} + \sqrt{\left(\frac{2 + \varepsilon}{2}\right)^2 - 1} \right]^i \quad (7)$$

с неопределенным пока параметром θ_0 .

Для $i = 1$ уравнение (4) принимает вид

$$\theta_0 - (2 + \varepsilon)\theta_1 + \theta_2 = 0.$$

Для $i = 0$ уравнение (5) принимает вид

$$\theta_{-1} - (2 + \varepsilon)\theta_0 + \theta_1 + \varepsilon = 0. \quad (8)$$

Подставляя в эти уравнения зависимости (6) и (7), получим систему уравнений

$$\theta_0 + (a - 2 - \varepsilon)\theta_1 = 0; \left(\frac{1}{b} - 2 - \varepsilon\right)\theta_0 + \theta_1 = \frac{1}{b} - 1 - \varepsilon, \quad (9)$$

из которых находим

$$\begin{aligned} \theta_1 &= \frac{1}{3 + \varepsilon - a}; \\ \theta_0 &= 1 - \frac{1}{3 + \varepsilon - a}. \end{aligned} \quad (10)$$

$$\theta_0 + (a - 2 - \varepsilon)\theta_1 = 0; \left(\frac{1}{b} - 2 - \varepsilon\right)\theta_0 + \theta_1 = \frac{1}{b} - 1 - \varepsilon, \quad (9)$$

from which we shall find

$$\begin{aligned} \theta_1 &= \frac{1}{3 + \varepsilon - a}; \\ \theta_0 &= 1 - \frac{1}{3 + \varepsilon - a}. \end{aligned} \quad (10)$$

As a result of the parametric studies, the models with a constant velocity of energy density in fire in the case of the slow premise burn ($\gamma \gg 1$) the following (6), (7), (10) relationships have been obtained which fully describe the steady-state temperature distribution in the chain of premises.

For the steady-state temperature distribution the temperature in the premise with the number $i = 1$ should be less than the ignition temperature: $\theta_1 < \theta_{ign}$ or taking into account (10)

$$\theta_{ign} > (\theta_{ign})_{пред}, \quad (11)$$

where

$$(\theta_{ign})_{пред} = \frac{1}{3 + \varepsilon - a}. \quad (12)$$

Obviously, if the (11) condition is satisfied, the fire distribution through the chain of premises is not possible: the ignition of the next premise doesn't happen and the fire stops, although burning continues in the already ignited premises.

The (12) relation between the $(\theta_{ign})_{пред}$ high-limit ignition temperature and the ε parameter is shown in Fig. 1 (line 2). It is seen that with the large values of the ε parameter (large heat loss), both models predict the similar values of the high-limit ignition temperature, however, with the small values of the ε parameter the model with a constant velocity of energy density in fire predicts the lower-limit ignition temperature values than the model with the constant fire temperature [2]. In particular, when $\varepsilon = 0$ the model with the constant fire temperature gives $(\theta_{ign})_{пред} = 1$, while the model with the constant velocity of energy density gives $(\theta_{ign})_{пред} = 0,5$.

The practical interest is the criterion which defines the conditions under which the fire arising in one of the premises can not spread to other premises. In this case the steady-state temperature distribution shall also be among the premises.

Let's define the criterion for the two variants of chains of premises:

a) an infinite chain where the fire is only in the premise with the number $i = 0$; in this case there is a symmetry condition: $\theta_{-1} = \theta_1$;

В результате параметрических исследований модели с постоянной скоростью энерговыделения при пожаре для случая медленного выгорания помещения ($\gamma \gg 1$) получены зависимости (6), (7), (10), полностью описывающие стационарное распределение температуры в цепочке помещений.

Для того чтобы стационарное распределение могло существовать, температура в помещении с номером $i = 1$ должна быть меньше температуры воспламенения: $\theta_1 < \theta_{ign}$ — или, с учетом (10),

$$\theta_{ign} > (\theta_{ign})_{пред}, \quad (11)$$

где

$$(\theta_{ign})_{пред} = \frac{1}{3 + \varepsilon - a}. \quad (12)$$

Очевидно, если условие (11) выполняется, распространение пожара по цепочке помещений становится невозможным: возгорание очередного помещения не происходит и пожар останавливается, хотя горение в уже воспламенившихся помещениях продолжается.

Зависимость (12) предельной температуры воспламенения $(\theta_{ign})_{пред}$ от параметра ε показана на рис. 1 линией 2. Видно, что при больших значениях параметра ε (большие тепловые потери) обе модели предсказывают близкие значения предельной температуры воспламенения, однако при малых значениях параметра ε модель с постоянной скоростью энерговыделения при пожаре предсказывает более низкие значения предельной температуры воспламенения, чем модель с постоянной температурой пожара [2]. В частности, при $\varepsilon = 0$ модель с постоянной температурой пожара дает $(\theta_{ign})_{пред} = 1$, в то время как модель с постоянной скоростью энерговыделения дает $(\theta_{ign})_{пред} = 0,5$.

Практический интерес представляет критерий, определяющий условия, при которых пожар, возникший в одном из помещений, не может распространиться на другие помещения. В этом случае также установится стационарное распределение температуры между помещениями.

Определим этот критерий для двух вариантов цепочек помещений:

a) бесконечная цепочка, в которой пожар происходит только в помещении с номером $i = 0$; в этом случае имеет место условие симметрии $\theta_{-1} = \theta_1$;

b) полубесконечная цепочка помещений, в которой пожар также происходит только в помещении с номером $i = 0$; в этом случае слева имеет место адiabатическое граничное условие $\theta_{-1} = \theta_1$.

Заметим, что в обоих этих случаях стационарное распределение температуры для помещений с номерами $i = 1, 2, \dots$ описывается соотношением (6), где

b) a semi-infinite chain, where the fire is also only in the premise with the number $i = 0$; in this case on the left there is an adiabatic boundary condition: $\theta_{-1} = \theta_1$;

Note that in both these cases the steady-state distribution of temperature for the premises with the numbers $i = 1, 2, \dots$ is described by the (6) relation, where the θ_1 temperature satisfies the (9) equation. For the θ_0 temperature the (8) equation is true which shall have a different form for the infinite and the semi-infinite chain of premises.

For the infinite chain of premises the (8) equation has the following form:

$$2\theta_1 - (2 + \varepsilon)\theta_0 + \varepsilon = 0.$$

Accordingly, we shall obtain

$$\theta_1 = -\frac{\varepsilon}{2 + (2 + \varepsilon)(a - 2 - \varepsilon)}.$$

The fire spread is impossible if $\theta_1 < \theta_{ign}$. Thus, the criterion which describes the conditions under which the fire in the chain of premises “stops” after the ignition of the first premise has the (11) form where

$$(\theta_{ign})_{пред} = -\frac{\varepsilon}{2 + (2 + \varepsilon)(a - 2 - \varepsilon)}. \quad (13)$$

For the semi-infinite chain of premises with the adiabatic boundary condition the (8) equation has the following form:

$$-(1 + \varepsilon)\theta_0 + \theta_1 + \varepsilon = 0.$$

Accordingly, we shall obtain

$$\theta_1 = -\frac{\varepsilon}{1 + (1 + \varepsilon)(a - 2 - \varepsilon)}.$$

Obviously, in this case the criterion which describes the conditions under which the fire distribution in the semi-infinite chain of premises with the adiabatic boundary condition is impossible has the (11) form where

$$(\theta_{ign})_{пред} = -\frac{\varepsilon}{1 + (1 + \varepsilon)(a - 2 - \varepsilon)}. \quad (14)$$

The (13) and (14) relations are shown in Fig. 1 with lines 4 and 3, respectively. It is obvious that all the relations of $(\theta_{ign})_{пред}$ and ε shown in Fig. 1, are close with large values of the ε parameter, however, with small heat losses they are significantly different and depend on both the model and the conditions of the fire emergence and development.

To clarify the effect of the spatial arrangement of premises in the real conditions in the floating dock towers on the parameters of the fire spread, let's consider the fire spread in a two-dimensional tower which is a flat grid, each cell of which is a separate premise.

температура θ_1 удовлетворяет уравнению (9). Для температуры θ_0 справедливо уравнение (8), которое для бесконечной и полубесконечной цепочек помещений будет иметь разный вид.

Для бесконечной цепочки помещений уравнение (8) приводится к виду

$$2\theta_1 - (2 + \varepsilon)\theta_0 + \varepsilon = 0.$$

Соответственно получим

$$\theta_1 = -\frac{\varepsilon}{2 + (2 + \varepsilon)(a - 2 - \varepsilon)}.$$

Распространение пожара невозможно, если $\theta_1 < \theta_{ign}$. Таким образом, критерий, описывающий условия, при которых пожар в цепочке помещений «останавливается» после возгорания первого помещения, имеет вид (11), где

$$(\theta_{ign})_{пред} = -\frac{\varepsilon}{2 + (2 + \varepsilon)(a - 2 - \varepsilon)}. \quad (13)$$

Для полубесконечной цепочки помещений с адиабатическим граничным условием уравнение (8) принимает вид

$$-(1 + \varepsilon)\theta_0 + \theta_1 + \varepsilon = 0.$$

Соответственно, получим

$$\theta_1 = -\frac{\varepsilon}{1 + (1 + \varepsilon)(a - 2 - \varepsilon)}.$$

Очевидно, в этом случае критерий, описывающий условия, при которых распространение пожара в полубесконечной цепочке помещений с адиабатическим граничным условием невозможно, имеет вид (11), где

$$(\theta_{ign})_{пред} = -\frac{\varepsilon}{1 + (1 + \varepsilon)(a - 2 - \varepsilon)}. \quad (14)$$

Зависимости (13) и (14) показаны на рис. 1 линиями 4 и 3 соответственно. Видно, что все зависимости $(\theta_{ign})_{пред}$ от ε при больших значениях параметра ε близки, однако при малых тепловых потерях они существенно отличаются и зависят как от модели, так и от условий возникновения и развития пожара.

Чтобы выяснить влияние пространственного расположения помещений в реальных условиях в башнях плавучего дока на параметры распространения пожара, рассмотрим распространение пожара в двухмерной башне, представляющей собой плоскую сетку, каждая ячейка которой является отдельным помещением.

Будем считать все помещения и все проводники пожара в здании одинаковыми; проводники соединяют только помещения, имеющие смежные переборки и выгородки.

We assume all the premises and all the fire conductors the same in the building; the conductors connect only the premises which have common bulkheads and recesses.

In the two-dimensional case for the model with the constant velocity of energy density the following [2] equation takes place

$$\frac{d\theta_{ij}}{dt} = \theta_{i-1,j} + \theta_{i+1,j} + \theta_{i,j-1} + \theta_{i,j+1} - (4 + \varepsilon)\theta_{ij} + \varepsilon I(\tau - \tau_{ign,ij}), \quad (15)$$

where θ_{ij} — is the temperature of the premise which is in the i row and the j column of the two-dimensional grid. All dimensionless variables and parameters are defined by the same relations as for the one-dimensional case.

Then we shall assume that the maximum values of i and j are much more than one which enables to consider the infinite grid.

Let's find the condition under which the fire which started in the premise with the number ($i = 0, j = 0$), can not distribute along the dock tower. In this case, there shall be the steady-state temperature distribution in the tower which is described by the equation

$$\theta_{i-1,j} + \theta_{i+1,j} + \theta_{i,j-1} + \theta_{i,j+1} - (4 + \varepsilon)\theta_{ij} + \varepsilon \delta_{i0} \delta_{j0} = 0.$$

It splits into two equations:

$$\theta_{i-1,j} + \theta_{i+1,j} + \theta_{i,j-1} + \theta_{i,j+1} - (4 + \varepsilon)\theta_{ij} = 0 \quad (16)$$

for all i, j simultaneously not equal to zero and

$$4\theta_{10} - (4 + \varepsilon)\theta_{00} + \varepsilon = 0. \quad (17)$$

In (17) it is taken into account that the symmetrical, and therefore, $\theta_{-1,0} = \theta_{10} = \theta_{0,-1} = \theta_{01}$.

Taking into account the symmetry of the equation, the solution of the (16) equation shall be sought in the form

$$\theta_{ij} = \theta_{10} a^{|i|+|j|-1}, \quad (18)$$

where a, θ_{10} are constant which have to be defined.

For the same reason, it is enough to consider the (16) equation for non-negative i, j .

Substituting (18) into (16) for $i \neq 0$ and $j \neq 0$, we shall get

$$a^2 - \frac{4 + \varepsilon}{2} a + 1 = 0.$$

Taking into account that θ_{ij} must satisfy the natural condition $\lim_{|i|,|j| \rightarrow \infty} \theta_{ij} = 0$, then the solution $a < 1$ of the two solutions of this equation shall be left, i. e.

$$a = \frac{4 + \varepsilon}{4} - \sqrt{\left(\frac{4 + \varepsilon}{4}\right)^2 - 1}. \quad (19)$$

В двухмерном случае для модели с постоянной скоростью энерговыделения имеет место уравнение [2]

$$\frac{d\theta_{ij}}{d\tau} = \theta_{i-1,j} + \theta_{i+1,j} + \theta_{i,j-1} + \theta_{i,j+1} - (4 + \varepsilon)\theta_{ij} + \varepsilon I(\tau - \tau_{ign,ij}), \quad (15)$$

где θ_{ij} — температура помещения, находящегося в строке i и столбце j двумерной сетки (15). Все безразмерные переменные и параметры определены теми же соотношениями, что и для одномерного случая.

В дальнейшем будем считать, что максимальные значения i и j существенно больше единицы, что позволяет рассматривать бесконечную сетку.

Найдем условие, при котором пожар, возникший в помещении с номером ($i = 0, j = 0$), не может распространяться дальше по башне дока. В этом случае в башне установится стационарное распределение температуры, которое описывается уравнением

$$\theta_{i-1,j} + \theta_{i+1,j} + \theta_{i,j-1} + \theta_{i,j+1} - (4 + \varepsilon)\theta_{ij} + \varepsilon \delta_{i0} \delta_{j0} = 0.$$

Оно распадается на два уравнения

$$\theta_{i-1,j} + \theta_{i+1,j} + \theta_{i,j-1} + \theta_{i,j+1} - (4 + \varepsilon)\theta_{ij} = 0 \quad (16)$$

для всех i, j , одновременно не равных нулю, и

$$4\theta_{10} - (4 + \varepsilon)\theta_{00} + \varepsilon = 0. \quad (17)$$

В (17) учтено, что задача — симметричная и, следовательно, $\theta_{-1,0} = \theta_{10} = \theta_{0,-1} = \theta_{01}$.

Учитывая симметрию задачи, решение уравнения (16) будем искать в виде

$$\theta_{ij} = \theta_{10} a^{|i|+|j|-1}, \quad (18)$$

где a, θ_{10} — постоянные, которые требуется определить.

По этой же причине достаточно рассмотреть уравнение (16) только для неотрицательных i, j .

Подставляя (18) в (16) для $i \neq 0$ и $j \neq 0$, получим

$$a^2 - \frac{4 + \varepsilon}{2} a + 1 = 0.$$

Учитывая, что θ_{ij} должно удовлетворять естественному условию $\lim_{|i|,|j| \rightarrow \infty} \theta_{ij} = 0$, из двух решений этого уравнения необходимо оставить $a < 1$, т. е.

$$a = \frac{4 + \varepsilon}{4} - \sqrt{\left(\frac{4 + \varepsilon}{4}\right)^2 - 1}. \quad (19)$$

Чтобы определить θ_{10} , подставим (18) в уравнение (16) для $i = 1$ и $j = 0$. Тогда

$$\theta_{10} + (3a - 4 - \varepsilon)\theta_{10} = 0.$$

To define θ_{10} , we shall substitute (18) into the (16) equation for $i = 1$ and $j = 0$, and we shall get

$$\theta_{10} + (3a - 4 - \varepsilon)\theta_{10} = 0.$$

Solving this equation, together with (17), we find

$$\theta_{10} = -\frac{\varepsilon}{4 + (4 + \varepsilon)(3a - 4 - \varepsilon)}.$$

For the fire spread not to occur there following relation should be true: $\theta_{10} < \theta_{ign}$.

Thus, the condition of the fire non-distribution along the dock tower in one of the premises has the (11) form where

$$(\theta_{ign})_{пред} = -\frac{\varepsilon}{4 + (4 + \varepsilon)(3a - 4 - \varepsilon)}. \quad (20)$$

The relation of $(\theta_{ign})_{пред}$ and ε is shown in Fig.2 (line 1); here is a similar (13) relation for the one-dimensional chain of premises.

Note that it is easily shown that for the model with the constant fire temperature the criterion of fire non-distribution in the two-dimensional case also has the (11) form when $(\theta_{ign})_{пред} = a$ where a is defined by the (19) relation.

In the process of designing and construction of composite floating docks special fire protection system is provided on it including: fire-protection constructions of decks and bulkheads (classes A-60, A-15, B-15), water and gasproof doors and lids, steam smothering piping, the remote control of fire pumps and ventilation, smoke and heat fire detectors and other fire-protection appliances.

In the towers built at the Kherson State Plant "Pallada" the fire system is installed in the composite floating docks. It has a circular layout. The rising main running from the fire pumps is located inside the heated premises,

Решая это уравнение совместно с (17), найдем

$$\theta_{10} = -\frac{\varepsilon}{4 + (4 + \varepsilon)(3a - 4 - \varepsilon)}.$$

Для того чтобы распространение пожара не происходило, должно быть $\theta_{10} < \theta_{ign}$.

Таким образом, условие нераспространения по башне дока пожара, возникшего в одном из помещений, имеет вид (11), где

$$(\theta_{ign})_{пред} = -\frac{\varepsilon}{4 + (4 + \varepsilon)(3a - 4 - \varepsilon)}. \quad (20)$$

Зависимость $(\theta_{ign})_{пред}$ от ε показана на рис. 2 (линия 1); здесь же показана аналогичная зависимость (13) для одномерной цепочки помещений.

Отметим, что для модели с постоянной температурой пожара критерий нераспространения пожара в двухмерном случае также имеет вид (11) при $(\theta_{ign})_{пред} = a$, где a определяется соотношением (19).

При проектировании и строительстве композитных плавучих доков на них предусматривают специальную систему противопожарной защиты, включающую в себя противопожарные конструкции палуб и переборок (класса А-60, А-15, В-15), водогазо-непроницаемые двери и крышки, трубопроводы пожаротушения, пост дистанционного управления пожарными насосами и вентиляцией, дымовые и тепловые пожарные извещатели и другие средства противопожарной защиты.

В башнях, построенных на ХГЗ «Паллада» композитных плавучих доков, установлена пожарная система, имеющая кольцевую схему расположения. Пожарный трубопровод, идущий от пожарных насосов, расположен внутри отапливаемых помещений, а отводы — на внутренних стенках башен на уровне

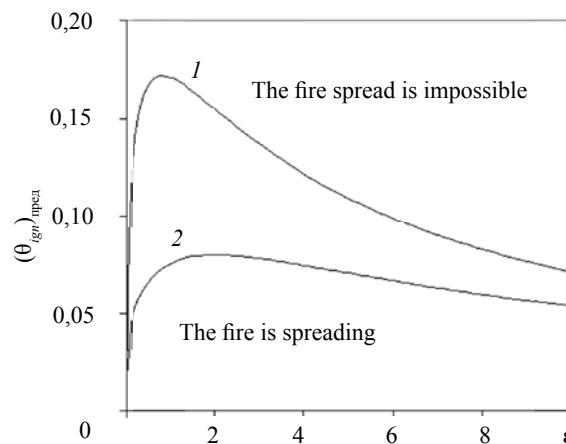


Fig. 2. Relation between the ignition limit of premises and the ε parameter:

Рис. 2. Зависимости предельной температуры воспламенения помещений от параметра ε :

1 — the one-dimensional model of the tower, the (13) relation / одномерная модель башни, зависимость (13); 2 — the two-dimensional model of the tower, the (20) relation / двухмерная модель башни, зависимость (20).

The fire is spreading — пожар распространяется; The fire spread is impossible — распространение пожара невозможно

and the taps are located in the inner sides of the towers at the keel blocks level. The taps are also taken out on the top deck and galleries. The foaming depression installations are placed in the dock towers, and the devices for their connection are taken out on the top deck [3].

The low pressure, acetylene and oxygen air system is made according to the ring scheme and located on the docks. The low pressure air vent piping with distributing columns located on the berth-deck, are connected by flexible hoses with a dock compressor and factory vent piping. The annular low pressure air vent piping is located on the inner side of the tower at the dock keel blocks level, and the oxygen and acetylene vent piping is located in the upper part of the internal sides of the towers. The operating pressure in the oxygen vent piping is equal to 1.0 ... 1.6 MPa and in acetylene ones it is equal to 0.5 MPa.

Before the test run all the oxygen vent piping is purged and dried with nitrogen or air without oil contamination, and before the acetylene installation starting all the appliances and pipes are flushed with nitrogen with the purity of at least 97.5%. After purging, the volume oxygen content in the appliances and vent piping must not exceed 3.5%. All the dock vent piping is connected to the factory routes using the flexible hoses.

CONCLUSION. 1. The mathematical model of the process of fire development and distribution in the floating dock towers has been developed and investigated taking into account the special features of the potential fire conductors which connect the premises. 2. The model allows calculating the possible scenarios and limiting modes of the fire distribution through the system of premises and assessing the fire hazard of the structures of various complexity. 3. The parametric study of the fire distribution through the system of premises is performed. It is shown that there are conditions under which the fire distribution can be stopped and the criteria of the fire spread can be defined.

кильблоков. Отводы также выведены на топ-палубу и галереи. Установки пеногашения размещены в башнях дока, а устройства для их подключения выведены на топ-палубу [3].

По кольцевой схеме на доках устроена система воздуха низкого давления, ацетилена и кислорода. Трубопровод воздуха низкого давления с раздающими колонками, установленными на стапель-палубе, соединен гибкими шлангами с доковым компрессором и заводским трубопроводом. Кольцевой трубопровод воздуха низкого давления расположен на внутренней стенке башни дока на уровне кильблоков, а трубопроводы кислорода и ацетилена — в верхней части внутренних бортов башен. Рабочее давление в кислородных трубопроводах составляет 1,0...1,6 МПа, а ацетиленовых — 0,5 МПа.

Перед пробным пуском все кислородные трубопроводы продувают и просушивают азотом или воздухом, не загрязненным маслом, а перед пуском ацетиленовой установки все аппараты и трубы продувают азотом чистотой не ниже 97,5%. После продувки объемное содержание кислорода в аппаратах и трубопроводах не должно превышать 3,5%.

ВЫВОДЫ. 1. Разработана и исследована математическая модель процесса развития и распространения пожара в башнях плавучего дока с учетом свойства потенциальных проводников пожара, связывающих помещения.

2. Модель позволяет рассчитывать возможные сценарии и предельные режимы развития пожара и оценивать пожарную опасность сооружений различной сложности.

3. Проведенные параметрические исследования распространения пожара по системе помещений показали, что существуют условия, при которых распространение пожара может остановиться. Определены критерии прекращения пожара.

Список литературы

- [1] **Брушлинский, Н. Н.** Моделирование пожаров и взрывов [Текст] / Н. Н. Брушлинский, А. Я. Корольченко. — М. : Познака, 2000. — 482 с.
- [2] Основы совершенствования пожарной безопасности в судостроении [Текст] : монография / А. С. Рашковский, С. А. Рашковский, Н. И. Поступальский [и др.]. — Николаев : НУК, 2007. — 321 с.
- [3] Проектирование, технология и организация строительства композитных плавучих доков большой подъемной силы [Текст] : монография / А. С. Рашковский, Н. Г. Слущкий, А. В. Щедролосев [и др.] ; под. науч. ред. А. С. Рашковского. — Николаев : РАЛ-полиграфия, 2008. — 382 с.
- [4] **Рашковский, С. А.** Сетевые модели распространения пожара в зданиях и на судах [Текст] / С. А. Рашковский, Н. И. Поступальский // 36. наук. праць НУК. — Миколаїв : НУК, 2005. — № 5 (404). — С. 163–168.
- [5] **Рашковский, С. А.** Тепловая модель распространения пожара в зданиях и на судах [Текст] / С. А. Рашковский, Н. И. Поступальский // 36. наук. праць НУК. — Миколаїв : НУК, 2006. — № 1 (406). — С. 44–53.

© А. С. Рашковский, С. А. Рашковский, Н. И. Поступальский, Д. В. Ермаков

Статью рекомендует в печать
д-р техн. наук, проф. *А. В. Щедролосев*