

УДК 614.84:629.5
Р 28

УПРАВЛЕНИЕ ПРОЕКТАМИ СОВЕРШЕНСТВОВАНИЯ ПОЖАРНОЙ БЕЗОПАСНОСТИ В СУДОСТРОЕНИИ

А. С. Рашковский, д-р. техн. наук, проф.¹

С. А. Рашковский, д-р физ.-мат. наук, вед. науч. сотр.²

¹ *Национальный университет кораблестроения, г. Николаев;*

² *Институт проблем механики РАН, г. Москва*

Аннотация. Приведены результаты исследований и разработки моделей выявления и распространения пожара в производственных цехах судостроительного предприятия, на строящихся и ремонтируемых судах.

Ключевые слова: судостроение, производственный цех, судно, пожар, модель распространения пожара.

Анотація. Наведено результати досліджень та розробки моделей виявлення й розповсюдження пожежі у виробничих цехах суднобудівного підприємства, на суднах, що будуються та ремонтуються.

Ключові слова: суднобудування, виробничий цех, судно, пожежа, модель розповсюдження пожежі.

Abstract. The results of research and development of fire identifying and spread models within the shipyard production shops, on ships under construction and repair were presented.

Keywords: shipbuilding, production shop, ship, fire, fire spread model.

ПОСТАНОВКА ПРОБЛЕМЫ

Одной из наиболее сложных проблем, возникающих при проектировании производственных зданий и различных плавучих сооружений, является оценка их пожарной опасности. Для каждого проектируемого объекта необходимо проанализировать сценарии развития возможных пожаров, пути распространения и разработать конструктивные, технические и организационные мероприятия по их предотвращению, локализации и тушению. Помощь в таком анализе может оказать компьютерное моделирование сценариев развития пожаров: задавая в различных местах первоначальные очаги воспламенения, можно проследить пути распространения пожара по объекту 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.

АНАЛИЗ ПОСЛЕДНИХ ИССЛЕДОВАНИЙ И ПУБЛИКАЦИЙ

Большинство производственных цехов судостроительных предприятий представляют собой пространства большого объема с элементами светопрозрачного покрытия (фонари различного типа, светопрозрачные кровли), расположенного под некоторым углом к вертикальным ограждениям цеха. Вертикальные ограждения обычно совмещаются с конструкциями смежных помещений различного назначения (конструкторские и технологические бюро, офисные и бытовые помещения, лаборатории, вентиляционные шахты, коридоры большой протяженности, лестничные площадки и марши и др.), расположенных на нескольких этажах и имеющих выходы в цех и наружу. В производственных

цехах имеются проемы большой площади в торцах и вдоль цеха, а смежные служебные помещения расположены с одной или с двух сторон [2, 5].

Как свидетельствуют статистические данные, вероятность возникновения пожара в сборочно-сварочных цехах и эллингах значительно выше, чем в других цехах судостроительного предприятия [1, 3]. Причины этого кроются в специфике организации и технологии работ, выполняемых в цехах, на строящихся и ремонтируемых судах. Здесь используются в большом количестве горючие материалы и вещества, легковоспламеняющиеся жидкости, взрывоопасные газы. Имеет место значительный объем огневых и огнеопасных работ, проводимых в сжатые сроки в небольших по объему отсеках и помещениях судна. Выполняется большой объем работ с лакокрасочными материалами, легковоспламеняющимися и горючими растворителями.

В служебных, офисных и бытовых помещениях, коридорах факторы пожарной опасности определяются особенностями конструкции, количественными и качественными характеристиками насыщенности горючими материалами. Это разветвленная система помещений, связанных коридорами, лестничными маршами, вентиляционными каналами. Количество выходов по длине здания ограничено.

В качестве источников загорания в помещениях могут быть тепловые проявления электрического тока при нарушениях монтажа и эксплуатации силового и осветительного электрооборудования, бытовых электроприборов. В этих помещениях располагаются персональные электронно-вычислительные машины, копировальная и другая оргтехника. Здесь возникает дополнительная пожарная опасность, обусловленная такими горючими компонентами, как изоляция сило-

вых, сигнальных и соединительных кабелей, обмоток электродвигателей, радиотехнические детали, блоки, панели и конструктивные элементы из пластических масс, жидкости для очистки элементов и узлов оргтехники от загрязнения. Источниками зажигания в этих помещениях могут быть электрические искры, перегретые участки элементов и конструкций оргтехники [1–3].

Проведен анализ случаев пожаров на территориях трех крупнейших в Украине судостроительных предприятий — ОАО «Николаевский судостроительный завод «Океан», ПАО «Черноморский судостроительный завод», ГП «Судостроительный завод имени 61 коммунара». По данным подразделений пожарной охраны заводов, в период с 2000 по 2009 год в производственных цехах, на строящихся и ремонтируемых судах произошло 102 пожара, из них 79 в цехах и их служебных помещениях. Такие пожары составляют около 77,5% от их общего числа, однако убытки от них превышают 90%.

ЦЕЛЬ СТАТЬИ — ознакомление с разработкой математических моделей и методов моделирования процесса развития и распространения пожара в производственных зданиях и плавучих сооружениях различной сложности.

ИЗЛОЖЕНИЕ ОСНОВНОГО МАТЕРИАЛА

Существующие в настоящее время модели развития пожара в помещениях основаны на трехмерных нестационарных расчетах, учитывающих газодинамические и теплофизические особенности процесса горения различных источников пожара. 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 даже несколько помещений, в рамках трехмерных нестационарных моделей в настоящее время весьма проблематичен.

С точки зрения пожарной опасности любое здание или плавучее сооружение 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 конструкции помещений, вентиляционные и лифтовые шахты, линии электропроводки, коридоры и многое другое, по которым может 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 зданию, а вниз и переходил на верхние этажи через нижние.

Отвлекаясь от реальной конструкции, здание, 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 $i = 1, 2 \dots$; 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).

В проведенных исследованиях рассмотрены несколько моделей распространения пожара, соответствующие разным уровням описания процесса: модель клеточных автоматов, модель вероятностных автоматов, тепловая модель развития пожара, модель проводников пожара, модели с конвективными проводниками пожара, с постоянной температурой пожара и с постоянной скоростью энерговыделения [1, 6, 7]. В качестве примера ниже рассмотрена одна из моделей — модель клеточных автоматов.

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

Расчет сценария распространения пожара по этой модели проводится следующим образом. В момент времени $t=0$ задается очаг пожара в некотором помещении $i=i_0$. Следующим воспламенится помещение с номером $j=j_{ign}$, для которого $\tau_{i_0,j}$ минимально; воспламенение произойдет в момент времени $t_{j_{ign}} = \min_j \tau_{i_0,j}$. Далее на каждом шаге расчета перебираются все воспламенившиеся помещения i_{ign} и связанные с ними проводниками пожара невоспламенившиеся помещения и определяется номер $j=j_{ign}$ следующего воспламенившегося помещения:

им будет то помещение, которое воспламенится в момент времени $t_{j_{ign}} = \min_{i_{ign}, j} (t_{i_{ign}} + \tau_{i_{ign}, j})$.

Несмотря на кажущуюся простоту модели, она демонстрирует довольно сложное поведение, при этом сложность быстро возрастает с увеличением числа помещений в здании.

Рассмотрим результаты расчета процесса распространения пожара в здании в рамках модели клеточных автоматов. Для наглядности будем рассматривать плоскую модель здания, его можно представить в виде сетки, каждая ячейка которой — помещение. В расчетах для простоты считалось, что пожар может переходить только между смежными помещениями (проводники пожара — стены). Для каждой пары смежных помещений с помощью датчика случайных чисел задавались значения τ_{ij} и τ_{ji} , которые рассматривались как безразмерное время передачи пожара.

При расчете процесса распространения пожара в реальных зданиях время τ_{ij} может либо рассчитываться исходя из моделей пожара и проводника пожара для каждой конкретной пары помещений, либо определяться из опыта на основе анализа развития пожаров в зданиях аналогичной конструкции. В качестве начальных условий с помощью датчика случайных чисел задавался номер помещения $i=i_0$, в котором возник первоначальный очаг пожара. Расчеты выполнялись для одного и того же здания при разных начальных условиях $i=i_0$.

Рассмотрены сначала изотропные помещения, в которых все проводники пожара статистически одинаковы. В этом случае время τ_{ij} может быть определено как $\tau_{ij} = \tau_0 + R(0,1)$, где $R(0,1)$ — случайное число,

равномерно распределенное в интервале $[0,1]$; τ_0 — постоянная, определяющая минимальное время передачи пожара проводниками. В такой модели время передачи пожара случайно и равномерно распределено в интервале $[\tau_0, \tau_0 + 1]$.

В качестве примера на рис. 1 показан сценарий развития пожара в прямоугольном «здании» размером 20×20 помещений при заданном расположении первоначального очага пожара для $\tau_0 = 0$.

Ячейки на рис. 1 соответствуют различным помещениям в здании; черная ячейка — помещение, с которого начался пожар. Для описания динамики пожара время, в течение которого все помещения в здании оказывались охваченными пожаром (для данного сценария пожара), делилось на десять интервалов. Для каждого из них определялись помещения, возгорание которых произошло в течение этого интервала. Цифры в ячейках отмечают номер интервала, в течение которого произошло возгорание данного помещения. Таким образом, рис. 1 позволяет наглядно представить динамику развития пожара в здании при заданном положении очага возгорания.

Другой характеристикой пожара является его объем — относительное число помещений здания, охваченных пожаром к данному моменту времени (когда все здание охвачено пожаром, объем пожара равен единице). Зависимость объема пожара от безразмерного времени для сценария пожара, показанного на рис. 1, приведена на рис. 2.

Для одного и того же здания при фиксированных значениях времени передачи пожара τ_{ij} сценарии развития

10	10	10	10	10	9	8	8	8	8	8	8	8	7	7	8	8	8	8	8	8	
9	9	10	9	9	8	8	7	7	7	6	6	6	6	6	7	7	7	7	7	8	8
9	8	9	8	8	7	8	7	6	6	6	6	6	6	6	7	7	7	6	7	8	
8	8	8	7	7	7	6	6	6	6	5	5	5	5	5	7	7	6	6	7	8	
8	8	7	8	6	6	6	6	5	5	5	5	4	5	5	6	6	6	6	7	8	
8	7	7	7	6	6	6	6	5	5	4	4	4	4	5	5	6	6	7	7		
8	7	6	6	6	5	5	5	5	4	4	4	3	4	5	5	5	6	7	7		
6	6	6	6	6	5	5	5	4	5	4	4	3	3	5	5	5	6	7	7		
6	6	5	5	5	5	4	5	4	4	3	4	3	3	4	5	6	6	7	7		
6	5	5	4	5	5	4	3	3	3	3	3	3	3	4	4	5	5	6	7		
5	5	4	4	4	3	3	3	3	2	2	3	3	3	3	5	5	5	6	7		
4	4	4	3	3	2	2	2	2	2	2	2	2	3	3	4	5	4	5	5		
5	4	4	3	3	2	2	1	1	1	1	1	2	2	3	3	4	4	4	5		
5	5	5	4	3	3	2	1	1	1	0	1	1	1	2	2	4	4	4	4		
5	5	5	4	3	3	3	2	2	1	1	1	1	1	2	3	3	4	5	5		
5	5	4	4	3	3	3	2	2	2	2	1	1	2	3	3	3	4	4	5		
5	5	4	4	3	3	3	3	2	2	1	2	3	3	3	3	4	5	5			
6	5	5	5	4	3	3	4	3	3	2	1	2	3	4	4	3	4	5	5		
6	5	5	5	5	4	4	4	4	3	3	2	3	3	4	4	4	4	5	5		
6	5	5	5	5	4	5	5	5	4	3	3	3	3	4	5	5	5	5	6		

Рис. 1. Один из сценариев развития пожара в здании размером 20×20 помещений. Черная ячейка — источник пожара, $\tau_0 = 0$

пожара будут отличаться в зависимости от того, в каком из помещений начнется пожар; в частности, зависимости объема пожара от времени для каждого положения первоначального очага пожара будут разными (рис. 2 характеризует только один из сценариев развития пожара, соответствующий конкретному положению первоначального очага пожара). Для каждого момента времени можно указать минимальный и максимальный объемы пожара (максимальное и минимальное число помещений, охваченных пожаром к данному моменту времени при всех возможных вариантах расположения первоначального очага пожара). Расчет предельных зависимостей объема пожара от времени выполняется простым перебором всех помещений здания в качестве первоначального очага пожара; при этом определяются минимальный и максимальный объемы пожара для различных моментов времени. Предельные зависимости объема пожара от времени для рассматриваемого модельного здания показаны на рис. 3.

Зависимости, соответствующие «медленному» и «быстрому» пожарам, позволяют определить соответственно наибольшее и наименьшее время, за которое объем пожара в данном здании достигнет заданного уровня. Эти данные могут быть основой для проектирования средств пожаротушения и разработки мероприятий по тушению возможных пожаров.

Чтобы выяснить влияние пространственного расположения помещений в реальных зданиях

на параметры распространения пожара, рассмотрено распространение пожара в двумерном здании, представленном плоской сеткой, каждая ячейка которой является отдельным помещением. Это тепловой аналог моделей, рассмотренных выше.

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

В двумерном случае для модели с постоянной скоростью энерговыделения имеет место уравнение

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

где θ_{ij} — температура помещения, находящегося в строке i и столбце j двумерной сетки. Все безразмерные переменные и параметры в (1) определены теми же соотношениями, что и для одномерного случая.

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

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

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

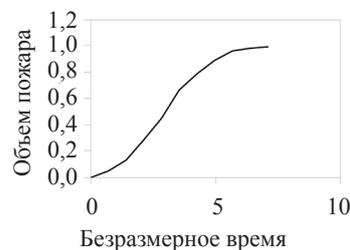


Рис. 2. Изменение объема пожара во времени для сценария развития пожара, показанного на рис. 1

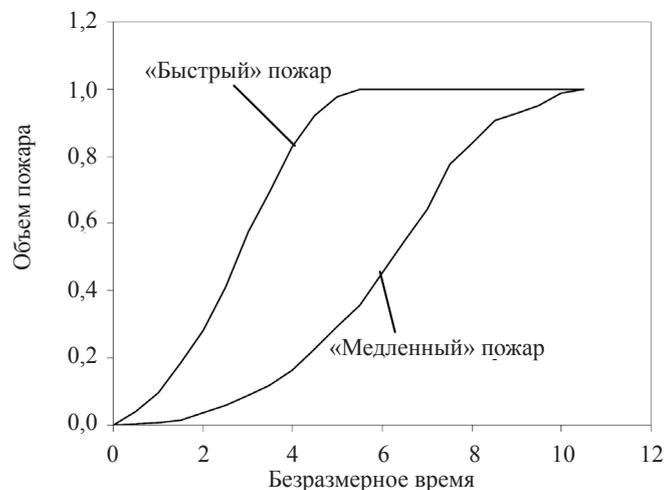


Рис. 3. Предельные режимы развития пожара в модельном здании размером 20×20 помещений для модели рис. 1

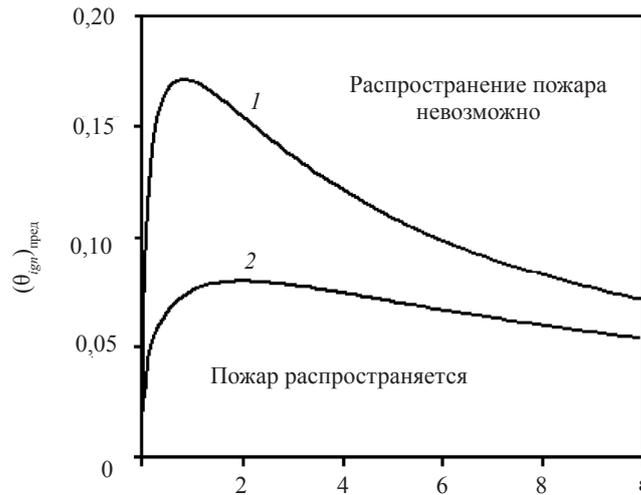


Рис. 4. Зависимости предельной температуры $(\theta_{ign}^{\text{пред}})$ воспламенения помещений от параметра ϵ : 1 — одномерная модель здания, зависимость (7); 2 — двумерная модель здания, зависимость (6)

Оно распадается на два уравнения:

$$\theta_{i-1,j} + \theta_{i+1,j} + \theta_{i,j-1} + \theta_{i,j+1} - (4 + \epsilon)\theta_{ij} = 0 \quad (2)$$

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

$$4\theta_{10} - (4 + \epsilon)\theta_{00} + \epsilon = 0. \quad (3)$$

В (3) учтено, что задача — симметричная и, следовательно, $\theta_{-1,0} = \theta_{10} = \theta_{0,-1} = \theta_{01}$.

Учитывая симметрию задачи, решение уравнения (2) будем искать в виде

$$\theta_{ij} = \theta_{10} a^{(|i|+|j|-1)}, \quad (4)$$

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

По этой же причине достаточно рассмотреть уравнение (2) только для неотрицательных i, j .

Подставляя (4) в (2) для $i \neq 0$ и $j \neq 0$, получим

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

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.

$$a = \frac{4 + \epsilon}{4} - \sqrt{\left(\frac{4 + \epsilon}{4}\right)^2 - 1}. \quad (5)$$

Чтобы определить θ_{10} , подставим (4) в уравнение (2) для $i = 1$ и $j = 0$. Получим

$$\theta_{00} + (3a - 4 - \epsilon)\theta_{10} = 0.$$

Решая это уравнение совместно с (3), найдем

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

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

Зависимость $(\theta_{ign}^{\text{пред}})$ от ϵ показана на рис. 4. Условие нераспространения по зданию пожара, возникшего в одном из помещений, имеет вид (кривая 2)

$$(\theta_{ign}^{\text{пред}}) = -\frac{\epsilon}{4 + (4 + \epsilon)(3a - 4 - \epsilon)}. \quad (6)$$

Аналогичная зависимость для одномерной цепочки помещений имеет вид (кривая 1)

$$(\theta_{ign}^{\text{пред}}) = -\frac{\epsilon}{2 + (2 + \epsilon)(a - 2 - \epsilon)}. \quad (7)$$

Отметим, что для модели с постоянной температурой пожара критерий нераспространения пожара в двумерном случае также имеет вид $\theta_{ign} > (\theta_{ign}^{\text{пред}})$ при $(\theta_{ign}^{\text{пред}}) = a$, где a определяется соотношением (5).

ВЫВОДЫ

1. Проведенные исследования показали возможность совершенствования пожарной безопасности в судостроении на основе использования моделей выявления и распространения пожара в производственных цехах судостроительного предприятия, на строящихся и ремонтируемых судах. 2. Приведены результаты разработки и исследования одной из математических моделей процесса распространения пожара в зданиях и на судах с учетом свойств потенциальных проводников пожара, связывающих помещения. Модели позволяют рассчитывать возможные сценарии и предельные режимы развития пожара, оценивать пожарную опасность сооружений различной сложности. 3. Определены условия, при которых распространение пожара может остановиться, и определены критерии прекращения пожара.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] Основы совершенствования пожарной безопасности в судостроении [Текст] : монография / А. С. Рашковский, С. А. Рашковский, Н. П. Романчук [и др.]. — Николаев : НУК, 2007. — 321 с.
- [2] **Поступальский, Н. И.** Особенности техногенно-пожарной опасности в судостроении [Текст] / Н. И. Поступальский // Матер. наук.-практ. конф. «Пожежна та техногенна безпека України — 2005». — К. : МНС України, 2005. — С. 18–20.
- [3] **Поступальский, Н. И.** Оценка пожарной опасности судостроительного производства [Текст] / Н. И. Поступальский, А. С. Рашковский // Матер. IV междунар. науч.-техн. конф. «Проблемы экологии и энергосбережения в судостроении». — Николаев : НУК, 2005. — С. 24–26.
- [4] **Поступальский, Н. И.** Совершенствование пожарной безопасности береговых объектов [Текст] / Н. И. Поступальский // Тези доп. наук.-техн. конф. «Живучість корабля та безпека на морі». — Севастополь : СВМИ, 2009. — С. 5.
- [5] **Рашковский, А. С.** Специфика пожарной опасности в судостроении [Текст] / А. С. Рашковский, Н. И. Поступальский // Тез. докл. на III Междунар. науч.-техн. конф. «Живучесть корабля и безопасность на море». — Севастополь : Севастопольский военно-морской институт им. П. С. Нахимова, 2005. — С. 19–21.
- [6] **Рашковский, А. С.** Сетевые модели распространения пожара в зданиях и на судах [Текст] / С. А. Рашковский, Н. И. Поступальский // Зб. наук. праць НУК. — Миколаїв : НУК, 2005. — № 5 (404). — С. 163–168.
- [7] **Рашковский, А. С.** Тепловая модель распространения пожара в зданиях и на судах [Текст] / С. А. Рашковский, Н. И. Поступальский // Зб. наук. праць НУК. — Миколаїв : НУК, 2006. — № 1 (406). — С. 44–53.

© О. С. Рашковский, С. О. Рашковский

Надійшла до редколегії 13.12.2011

Статтю рекомендує до друку член редколегії Вісника НУК
д-р техн. наук, проф. *В. С. Бліцтов*

Статтю розміщено у Віснику НУК № 1, 2012