



Research Article

Received: June 29, 2023

Accepted: July 27, 2023

Published: August 13, 2023

ISSN 2304-6295

Fire curtains: models of heat transfer in composite materials

Gravit, Marina Viktorovna¹ Nedryshkin, Oleg Vyacheslavovich¹ Shabunina, Daria Evgenievna^{1*} Shcheglov, Nikita Evgenievich¹ Shinkareva, Maria Konstantinovna¹

¹ Peter the Great St.Petersburg Polytechnic University, St.Petersburg, Russian Federation; marina.gravit@mail.ru (G.M.V); nedryshkin@gmail.com (N.O.V); d.shabunina00@gmail.com (S.D.E); tsheglov.ne@gmail.com (S.N.E); shinkareva_mk@spbstu.ru (S.M.K)

Correspondence: email d.shabunina00@gmail.com; contact phone [+79221559844](tel:+79221559844)

Keywords:

Fire curtain; Transformable barrier; Fire resistance limit; Thermal insulation capacity; Heat transfer simulation; Aerogel

Abstract:

The object of research is samples of multilayer protective fabrics for transformable fire barriers installed in buildings and structures to limit the spread of flame, heat flow, and smoke. The work aims to obtain the structure of a transformable fire curtain with fire resistance limits of E60 (loss of integrity) and I30 (loss of thermal insulating capacity). **Method.** The mathematical simulation method in the software package (SP) ELCUT (Russia), which implements the finite element method, was used to get the temperature distribution along the cross-section of the fire curtain. An experimental study was conducted on a small furnace to confirm the simulation results. **Results.** Based on the simulation results of eight samples of fire curtains, two promising fabrics were selected that demonstrate a fire resistance limit in terms of loss of thermal insulating capacity (I) of 30 minutes. In small-scale tests, it was found that the best result was the fire curtain containing glass fiber, intumescent mesh, and foil material. The canvas consisting of a single layer of aerogel showed the worst results regarding loss of integrity (E). The simulation results were confirmed by small-scale furnace tests with no more than 10% convergence.

1 Введение / Introduction

Пожар в зданиях и сооружениях обычно происходит в закрытой среде, что позволяет опасным факторам пожара (ОФП) быстро распространяться, тем самым, блокируя эвакуационные пути [1]. На распространение ОФП влияет конструктивное исполнение и объемно-планировочные решения зданий и сооружений, использование противодымной вентиляции и средств механической и естественной вытяжной противодымной вентиляции [2]. В качестве конструктивного исполнения для защиты дверных проемов в пожарных отсеках и использовании пожарного отсека в здании любого функционального назначения применяют трансформируемые противопожарные преграды в виде занавес (штор) [3]. Противопожарные шторы при пожаре выполняют две функции: создают барьер для предотвращения распространения ОФП в другие помещения и предотвращают поступление кислорода в помещение с развивающимся очагом пожара, что приводит к постепенному затуханию пожара внутри данного помещения. Противопожарные шторы используются для защиты вертикальных и горизонтальных проёмов, тоннельных сооружений и станционных комплексов метрополитена. благодаря универсальности и эффективности в работе при возникновении пожара [4], [5].

Характерной конструктивной особенностью противопожарных штор является исполнение ограждающей части (рабочего полотна) в виде эластичного плоского элемента из термостойких

материалов с высокой теплоизолирующей способностью [6] и использование легких материалов, обеспечивающих сворачиваемость в рулон в условиях эксплуатации и отсутствия пожара и разворачиваемость в виде полотна при пожаре [7]. Полотно шторы представляет собой многослойное изделие, чаще всего с двух сторон закрываемое кремнеземной, керамической, кварцевой, базальтовой или стеклянной тканью, основным критерием которых является возможность эксплуатации при температуре в интервале от 650 °С до 1000 °С [8]. При прокаливании термостойких материалов в условиях повышенных температур происходит потеря прочностных свойств волокон, следовательно, снижается разрывная нагрузка. В связи с этим повышается вероятность обрыва шторы с вала и появление трещин и щелей в полотне (потеря целостности «Е»).

Согласно российскому государственному стандарту ГОСТ Р 53307-2009 [9], шторы классифицируются по огнестойкости по предельным состояниям EI (E – предельное состояние по потере целостности, I – предельное состояние по потере теплоизолирующей способности): EI60, EI120, E60, E120, E180 – как правило, с использованием орошения; EI 30 и E60 – без орошения. Сохранение целостности полотна шторы (параметр по пределу огнестойкости E) является первоочередной задачей, поскольку образование трещин и разрывов не позволят дальше использовать конструкцию противопожарной шторы в качестве барьера для предотвращения распространения пламени, теплового потока и дыма в соседние помещения.

Согласно российскому Федеральному закону ФЗ-123 [10], при эксплуатации противопожарных штор в открытом положении, они должны быть оборудованы устройствами, обеспечивающими их автоматическое закрывание при пожаре, а также данная противопожарная конструкция должна сохранять работоспособность в условиях пожара в течение времени, необходимого для эвакуации людей в безопасную зону и раскрытия противопожарной шторы для предотвращения распространения ОФП. Шторы оснащаются электронной автоматической системой, которая присоединяется к центральной пожарной сигнализации, дымовым извещателям и другим системам оповещения и защиты [11].

Противопожарная штора с пределами огнестойкости E 60, EI 60/EI 30 наиболее распространена [12]. Конкретный выбор шторы зависит от требуемого предела огнестойкости конструкции по потере целостности и по потере теплоизолирующей способности, и от типа изделия. Типовое устройство шторы и трансформируемого полотна представлено на Рисунке 1.

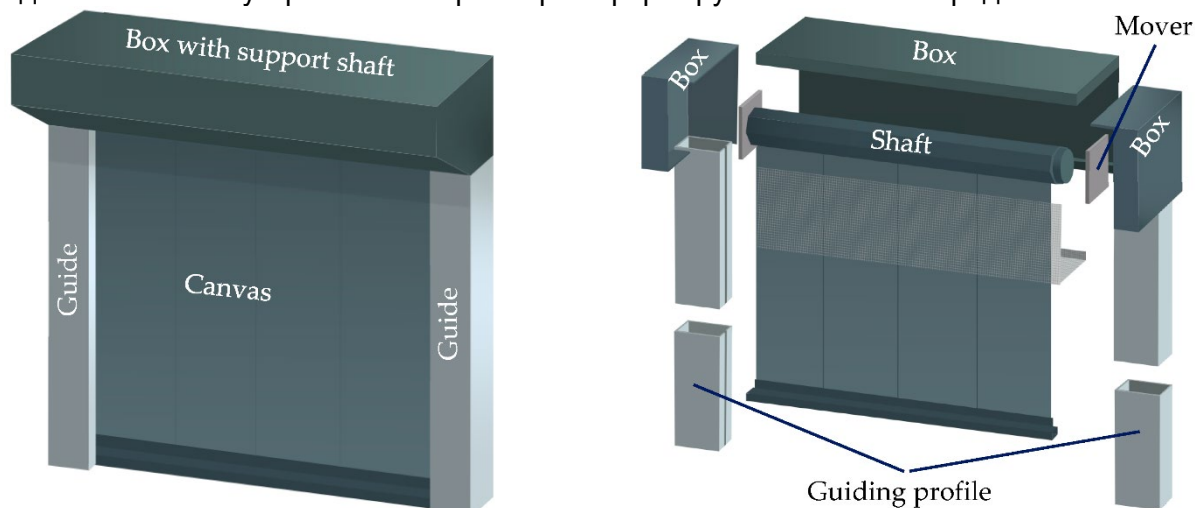


Рис. 1 - Типовое устройство трансформируемой противопожарной шторы
Fig. 1 - Typical construction of a transformable fire curtain

В работе [13] рассмотрена противопожарная штора с двумя слоями теплоизолирующего материала на основе фольгированного базальтового волокна (16 мм) и жидкостекольной композиции в виде клея для предотвращения распространения пламени, теплового потока и дыма и для обеспечения безопасной эвакуации людей. По результатам исследования получено, что при общей толщине слоя 30 мм и размере полотна 2000х2000 мм, время достижения предельного состояния по теплоизолирующей способности составляет 31 минуту и по потере целостности 60 минут. В исследовании [14] получено, что при прокаливании кремнеземных материалов в условиях предельных температур (при пожаре) они теряют прочностные свойства волокон, снижается разрывная нагрузка. В связи с этим повышается вероятность обрыва шторы с вала

Gravit, M.; Nedryshkin, O.; Shabunina, D.; Shcheglov, N.; Shinkareva, M.

Fire curtains: models of heat transfer in composite materials;

2023; *Construction of Unique Buildings and Structures*; **109** Article No 10908. doi: 10.4123/CUBS.109.8



(потеря целостности E). Таким образом, в работе [14] предложено многослойное полотно трансформируемой противопожарной преграды, по результатам экспериментального исследования которой получен предел огнестойкости E60.

Целью работы является получение полотна трансформируемой противопожарной шторы с пределами огнестойкости E60 (по потере целостности) и I30 (по потере теплоизолирующей способности).

Для достижения цели решены следующие задачи исследования: определены материалы для полотна противопожарной шторы, составлены восемь прототипов штор, в основе которых применены наиболее широко распространенные теплоизоляционные материалы, методом моделирования получены значения теплоизолирующего параметра (I) на обогреваемых сторонах противопожарной трансформируемой преграды, проведены маломасштабные испытания образцов полотен для подтверждения результатов моделирования.

2 Материалы и методы / Materials and Methods

2.1. Состав слоев полотна трансформируемой шторы / Composition of the fabric layers of a transformable curtain

В качестве образцов использовались различные композиции полотен, обшитые термоусаживаемой тканью марки КТ-Э-115-ТО (ООО ТД «СпецТехТрейд», Москва, Россия). На основе патентного поиска и анализа научной литературы [15]–[18], составлено восемь образцов, имеющих в своем составе различные материалы (таблица 1).

Таблица 1. Состав противопожарных штор
Table 1. Composition of fire curtains

№ образца	Состав слоев полотна	δ, м
Образец №1	Интумесцентный состав	0.005
Образец №2	Интумесцентный состав (с добавлением TiO ₂ и 2O ₃)	0.005
Образец №3	Термостойкий силикон, интумесцентный состав	0.011
Образец №4	Интумесцентный состав, карбоновая ткань, фольгированный материал	0.016
Образец №5	Интумесцентный состав, базальтовое волокно, фольгированный материал	0.012
Образец №6	Стекловолокно, сетка с интумесцентным составом, фольгированный материал	0.012
Образец №7	Слой аэрогеля Alison Aerogel GR10 (EcPlaza, Guangdong, China)	0.012
Образец №8	Слой аэрогеля Alison Aerogel GR10 толщиной 12 мм и слой керамического холста Ceraterm Blanket толщиной 12 мм	0.024

2.2. Моделирование в ПК Elcut / Simulation in SP Elcut

В качестве инструмента моделирования применялся программный комплекс (ПК) Elcut, позволяющий задать источники тепла в блоках, рёбрах или отдельных вершинах модели методом конечных элементов.

При моделировании задачи прогрева в ПК Elcut используется уравнение теплопроводности, определяемое зависимостью (1) [19]:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda_x \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\lambda_y \frac{\partial T}{\partial y} \right) = -q - c\rho \cdot \frac{\partial T}{\partial t}, \quad (1)$$

где T – температура, °C; t – время, с; λ – компоненты тензора теплопроводности, Вт/(м·К); q – удельная мощность тепловыделения, Вт/м³; c – удельная теплоемкость, Дж/(кг·К); ρ – плотность, кг/м³.

Граничные условия, описываемые температурой, тепловым потоком, конвекцией и радиацией, задаются на внешних и внутренних границах расчетной схемы. Значение T_0 задается в виде линейной функции координат. Тепловой поток описывается соотношениями (2) и (3) [19]:

$$F_n = -q_s \text{ – на внешних границах,} \quad (2)$$



$$F_n^+ - F_n^- = -q_s \text{ - на внутренних границах,} \quad (3)$$

где F_n нормальная компонента вектора плотности теплового потока, индексы "+" и "-" означают "слева от границы" и "справа от границы" соответственно, Вт/м²; q_s - поверхностная мощность источника для внутренней границы, для внешней - известное значение теплового потока через границу, Вт/м².

Конвективный теплообмен определяется согласно выражению (4) [20]:

$$F_n = \alpha \cdot (T - T_0), \quad (4)$$

где α – коэффициент теплоотдачи, Вт/(К·м²); T_0 - температура окружающей среды, К.

Условие радиации задается на внешней границе модели, радиационный теплообмен определяется уравнением (5) [19]:

$$F_n = k_{SB} \cdot \beta \cdot (T^4 - T_0^4) \quad (5)$$

где k_{SB} - константа Стефана-Больцмана, Вт/(м²·К⁴); β - коэффициент поглощения поверхности; T_0 – температура поглощающей среды, К.

Исходные характеристики интумесцентного состава, аэрогеля, фольгированного базальтового волокна и других компонентов взяты из справочника программы и научных работ [21–23] (Таблица 2). В качестве допущения принято, что значение плотности в процессе нагрева не изменяется.

Таблица 2. Теплофизические характеристики материалов
Table 2. Thermophysical characteristics of materials

Материал	Плотность, кг/м ³	λ , Вт/(м·К) при T, °C			C_p , Дж/(кг·К), при T, °C		
		20	100	300	20	100	300
Интумесцентный состав	500	0.3	0.3	-	1000	1000	-
Пенококс	30	-	-	0.02	-	-	700
Термостойкий силикон	1100	0.133	0.116	0.073	2060	2150	2550
Фольгированное базальтовое волокно	110	0.035	0.052	0.090	800	900	1000
Стекловолокно	200	0.045	0.050	0.070	840	865	882
Аэрогель	200	0.020	0.025	0.039	700	700	700
Шамотный кирпич	1850	0.85	0.9	1.02	931	1135	1645

Граничные условия представлены в таблице 3.

Таблица 3. Граничные условия, заданные в ПК Elcut
Table 3. Boundary conditions defined in SP Elcut

Наименование величины	Значение величины	Источник информации
Коэффициент теплоотдачи конвекцией при стандартном температурном режиме, Вт/(м ² ·К)	25	[20]
Коэффициент поглощения поверхности	0.5	[20]
Начальная температура окружающей среды, °C*	20	-
Шаг времени расчета температурного градиента конструкции, с	60	-

На рисунках 2–4 представлено задание граничных условий на необогреваемой и обогреваемой сторонах и задание основных теплофизических свойств аэрогеля и керамического холста ПК Elcut.

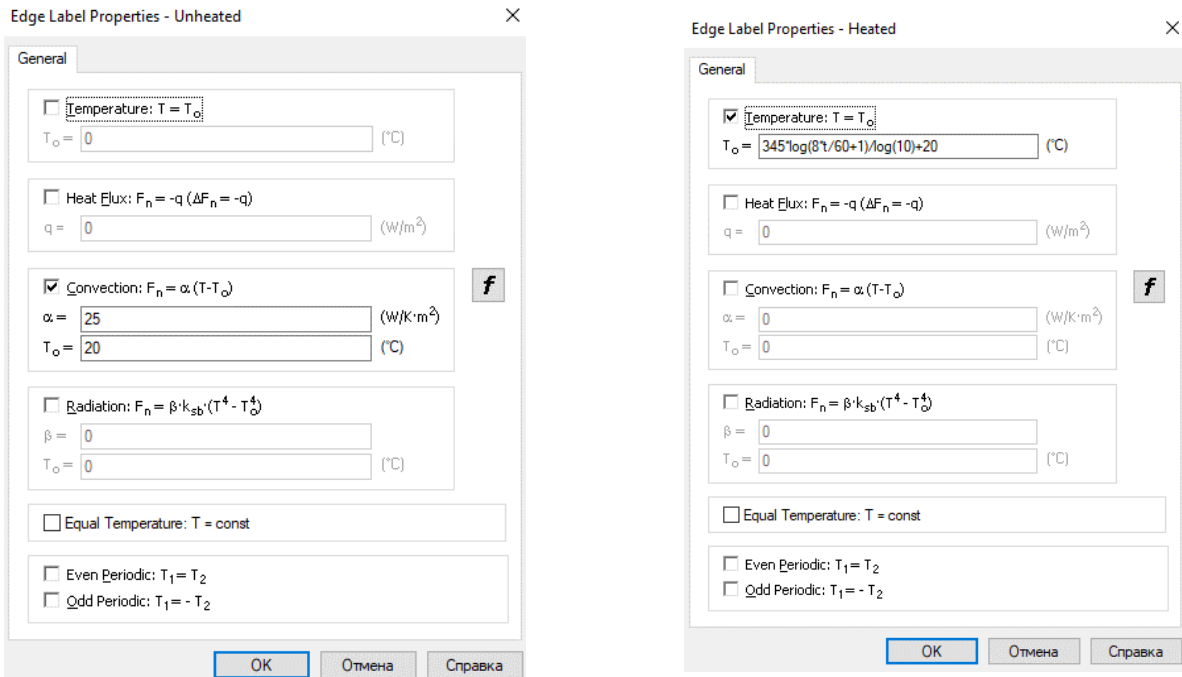


Рис. 2 - Задание граничных условий в ПК Eicut
Fig. 2 - Setting boundary conditions in SP Eicut

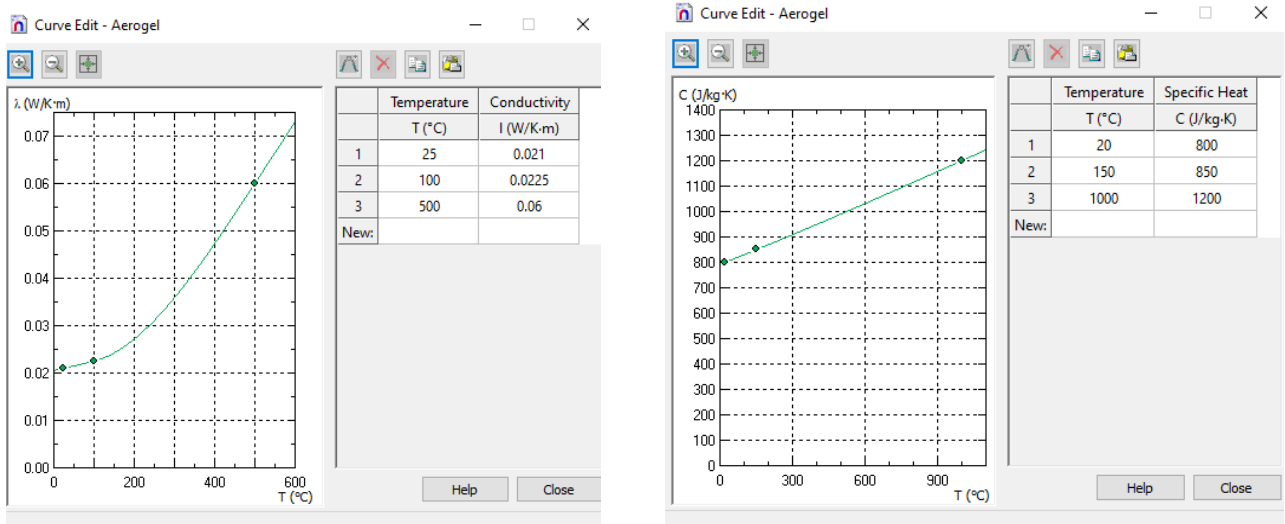


Рис. 3 - Задание теплофизических свойств для аэрогеля в ПК Eicut
Fig. 3 - Setting thermophysical properties for aerogel in SP Eicut

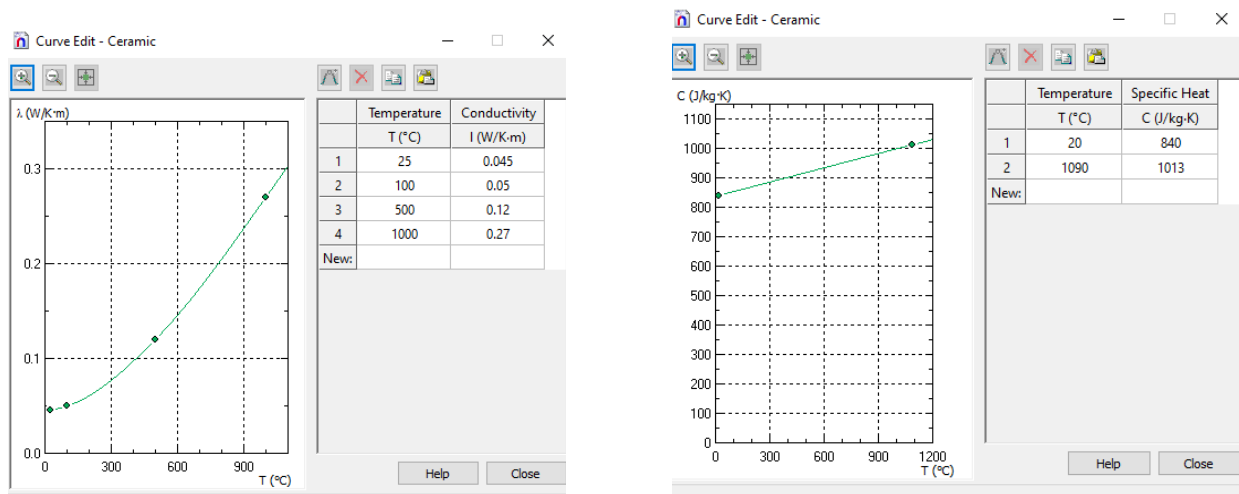


Рис. 4 - Задание теплофизических свойств для керамического холста в ПК Elcut
Fig. 4 - Setting thermophysical properties for ceramic canvas in SP Elcut

Моделирование прогрева восьми прототипов полотен трансформируемых противопожарных штор выполнено для прогнозирования значений температуры полотна с необогреваемой стороны и определения оптимальных составов противопожарных штор. Примеры расчетных схем для образцов №6 и №7 представлены на рисунке 5.

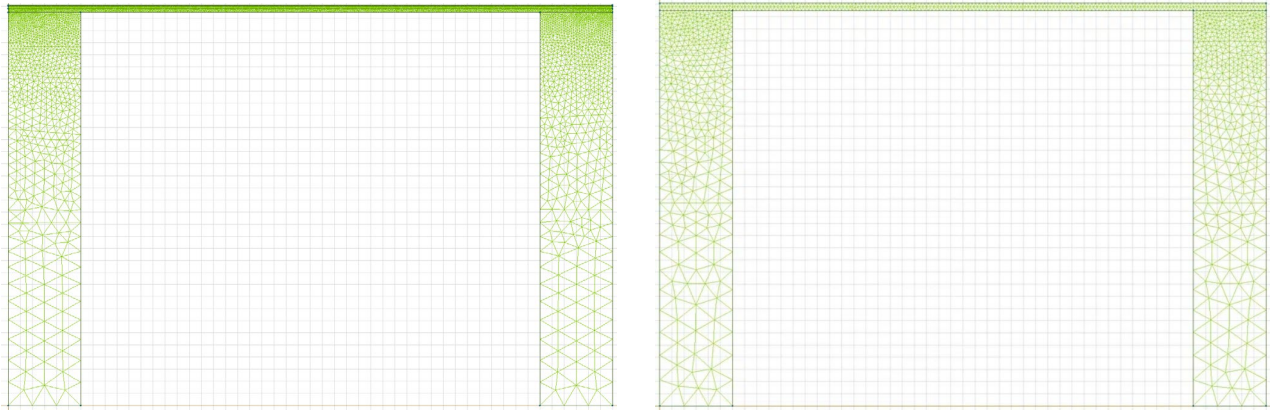


Рис. 5 - Расчетные схемы образца №6 (слева) и образца №7 (справа)
Fig. 5 - Calculation schemes of Sample No. 6 (left) and Sample No. 7 (right)

2.3. Маломасштабное испытание / Small-scale testing

Согласно российскому государственному стандарту ГОСТ Р 53307-2009 [9], достижение предельного состояния по потере целостности (E) происходит в результате образования в конструкции сквозных трещин или отверстий, через которые проникают продукты горения или пламя, а именно:

- появление устойчивого пламени на необогреваемой поверхности опытного образца длительностью 10 секунд и более;
- воспламенение или возникновение тления со свечением ватного тампона в результате воздействия огня или горячих газов, в течение 10 секунд после поднесения к образцу;
- образование в конструкции опытного образца сквозных отверстий (щелей) с размерами, позволяющими щупу диаметром 6 мм проникать и перемещаться вдоль отверстия (щели) на расстояние не менее 150 мм или щупу диаметром 25 мм беспрепятственно проникать в сквозные отверстия;
- выпадение полотна образца из коробки или же самой коробки из ограждающей конструкции.

Достижение предельного состояния по потере теплоизолирующей способности (I) происходит вследствие повышения температуры на необогреваемой поверхности образцов в среднем более чем на 140 °С в сравнении температурой поверхности опытного образца (с учетом температуры начала испытания) до испытания на дымо- и газопроницаемость.

Для валидации модели проведены маломасштабные испытания образцов, для которых использовалась малогабаритная печь производства ООО «НПК ПРОМИЗОЛ» (Москва, Россия) из шамотного кирпича с габаритными размерами: 790x790x965 мм., в которой дизельным топливом (две горелки) регулировалась температура в печи по стандартному температурному режиму согласно международному ISO 834-75 [24], основные положения которого гармонизированы сс с российским государственным стандартом ГОСТ 30247.0-94 [25] (рисунок 6). Габариты исследуемых противопожарных трансформируемых преград – 1000x1000 мм.



Рис. 6 - Печь для проведения маломасштабного испытания
Fig. 6 - Furnace for small-scale testing

Температура в огневой камере печи во время проведения испытаний поддерживалась в соответствии с требованиями российского государственного стандарта ГОСТ 30247.0-94 [25]. Продолжительность проведения экспериментального исследования - 60 минут.

3 Результаты и обсуждение / Results and Discussion

3.1. Результаты моделирования и получение наиболее предпочтительных составов полотен противопожарных штор / Results of simulation and obtaining the most preferable compositions of fire curtain fabrics

В результате моделирования получены визуализации прогрева конструкций противопожарных штор. В качестве примера на рисунке 7–8 приведены результаты прогрева для образца №7 и образца №8.

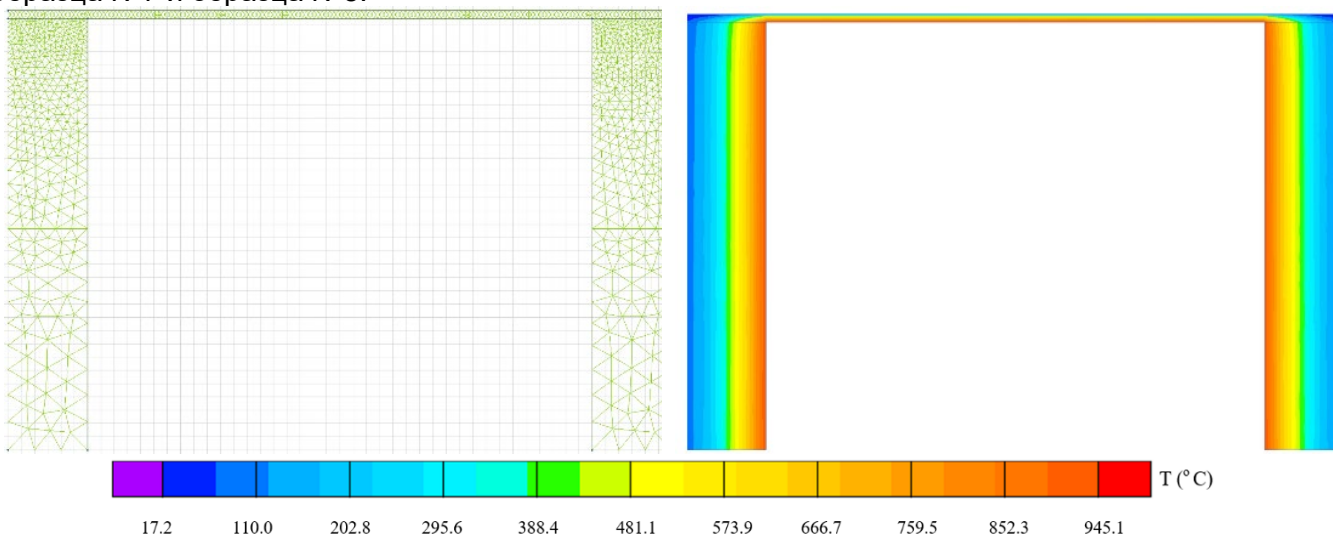


Рис. 7 - Визуализация прогрева образца №7
Fig. 7 - Heating visualization of Sample No.7

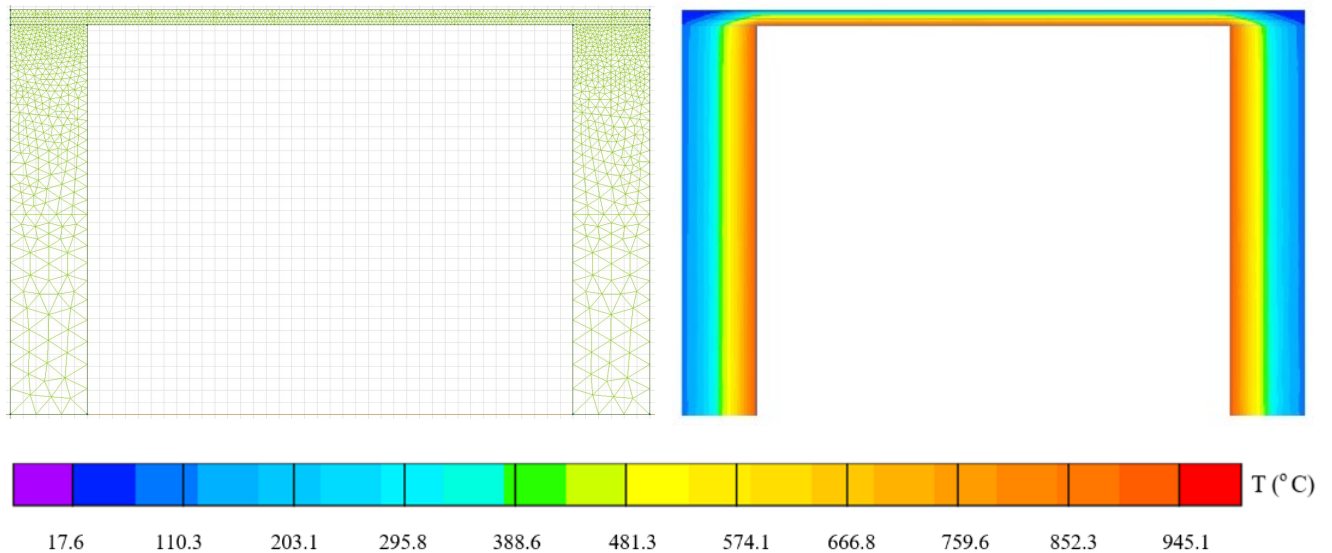


Рис. 8 - Визуализация прогрева образца №8
Fig. 8 - Heating visualization of Sample No.8

Получены расчетные зависимости температуры от времени в точке расположения термопар на необогреваемой поверхности трансформируемых противопожарных штор (рисунок 9).

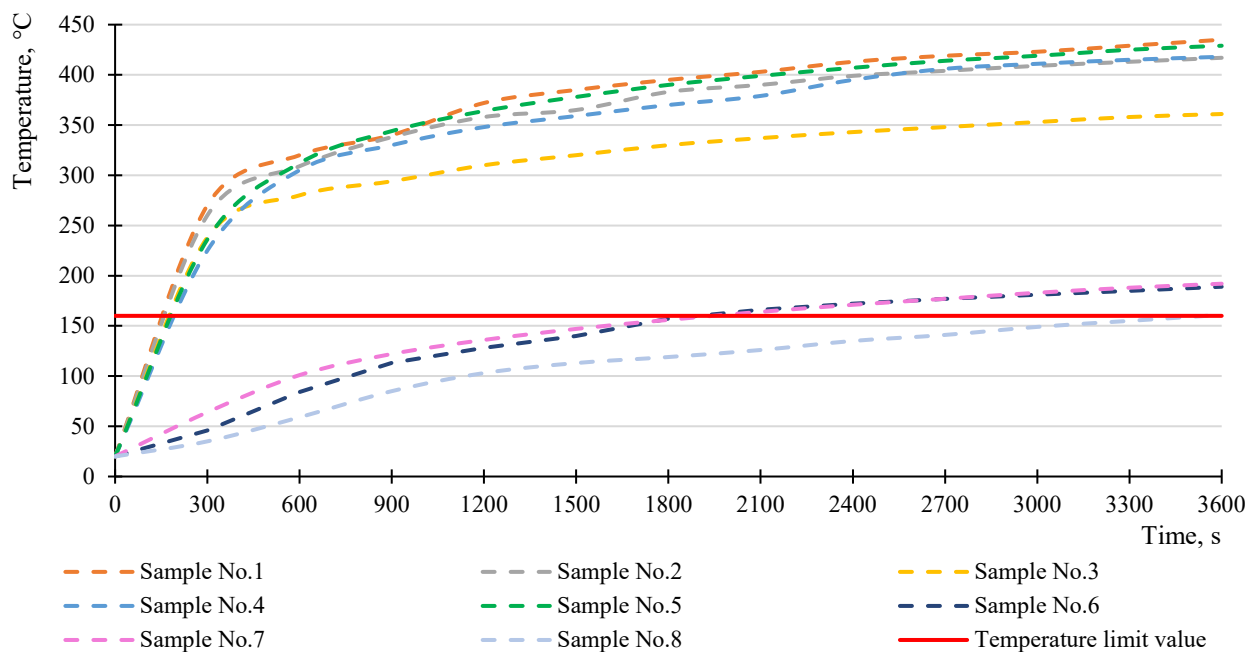


Рис. 9 - Расчетные температурные кривые рассматриваемых образцов при воздействии стандартного температурного режима
Fig. 9 - Calculated temperature curves of the samples under standard temperature conditions

Как видно из рисунка 9, графики для образцов №1, №2, № 4 и № 5, содержащие в основе интумесцентные составы, растут с большей скоростью в первые минуты огневого воздействия, в то время как образец №3, дополнительно имеющий термостойкий силикон, показывают лучшие значения по температуре на необогреваемой поверхности трансформируемого полотна. Модели с интумесцентными составами, несмотря на отрицательные результаты по сравнению с другими образцами, остаются перспективными для последующего исследования из-за их возможности к расширению и образованию пенококса с низкой теплопроводностью и экономического потенциала. В среднем при увеличении толщины прототипа можно достичь снижения температуры с необогреваемой стороны на 40 %. При этом в условиях реальной эксплуатации

трансформируемые противопожарные шторы толщиной 20–50 мм функционально не отличаются от рулонных ворот, в связи такое инженерное решение нецелесообразно.

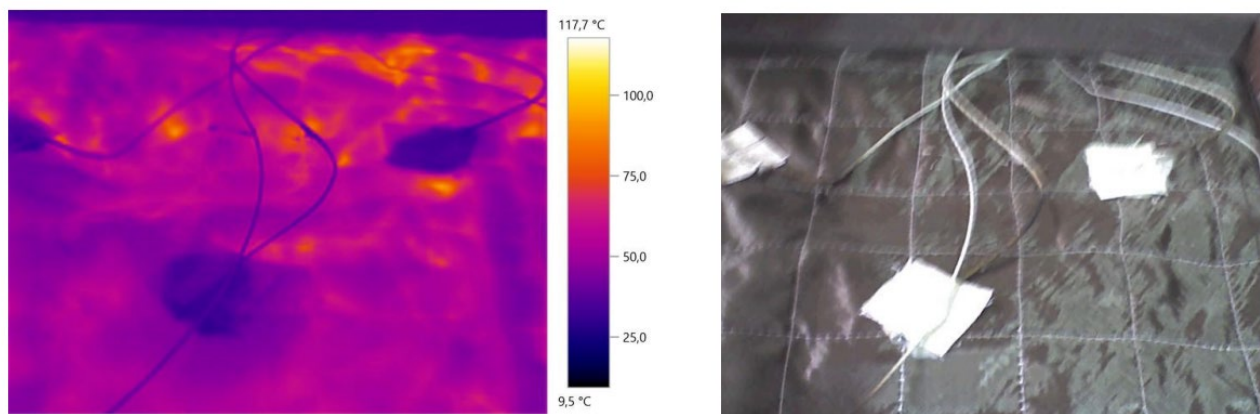
Как видно из рисунка 9, образцы №6–№8 показали предпочтительные результаты для их изготовления и проведения огневых испытаний. Образец №8, демонстрирующий наименьшие значения температур, имеет толщину противопожарной шторы 0.024 м. В связи с большей технологичностью и большей сворачиваемостью огнестойкого полотна в рулон при изготовлении изделия, целесообразно использовать противопожарные шторы от 5 до 12 мм.

3.2. Результаты маломасштабного испытания / Results of a small-scale testing

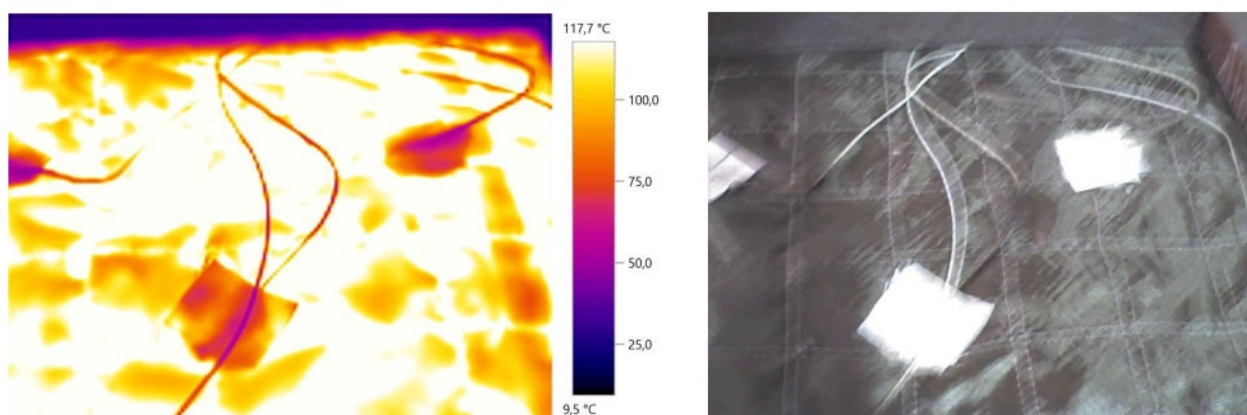
По результатам моделирования прогрева противопожарных трансформируемых преград выбраны образцы №6 и №7 для проведения маломасштабных испытаний.

Для образца №6 огневое маломасштабное испытание прекращено на 61 минуте по заданию технического заказчика. Достижение предельного состояния по потере теплоизолирующей способности (увеличение температуры на необогреваемой поверхности конструкции в среднем более чем на 140 °С) зафиксировано на 33-й минуте проведения экспериментального исследования. По результатам испытания не наблюдалось проникновение дыма и пламени на необогреваемую сторону, сохранена целостность образца. Установлено, что образец №6, состоящий из стекловолокна, сетки с интумесцентным составом и фольгированного материала (суммарная толщина 12 мм), обладает пределом огнестойкости в условиях воздействия стандартного температурного режима E60 (по потере целостности) и I30 (по потере теплоизолирующей способности).

На протяжении экспериментального исследования образца №6 дополнительно определялись температуры с использованием термограммы (Рисунок 10).



Первая минута проведения экспериментального исследования
The first minute of the experimental study



Двадцатая минута проведения экспериментального исследования
The twentieth minute of the experimental study

Рис. 10 - Термограммы и визуальное отображение образца №6 во время огневого испытания

Fig. 10 - Thermograms and visualization of Sample No.6 during the fire test

Для образца №7 огневое маломасштабное испытание прекращено на 29-й минуте по причине достижения потери целостности образца на 28-й минуте огневого воздействия. По результатам испытания наблюдались пробои в противопожарном полотне и выход сажи на необогреваемую поверхность. Таким образом, целостность образца №7 нарушена (Рисунок 11). Установлено, что образец №7, состоящий из слоя аэрогеля толщиной 12 мм, обладает пределом огнестойкости в условиях воздействия стандартного температурного режима E15 (по потере целостности) и I15 (по потере теплоизолирующей способности).



Рис. 11 - Появление пробоев на образце № 7 при проведении огневого испытания
Fig. 11 - Appearance of breakdowns on Sample No. 7 during the fire test

Результаты распределения температуры на необогреваемой стороне противопожарных полотен образцов №6 и №7 представлены на Рисунке 12 (для каждого образца представлено среднее значение температуры по установленным на образце пяти термопар). Различное расположение термопар по сечению образцов представлено на рисунке 6. По результатам моделирования получена отличная корреляция результатов (расхождение значений – не более 5–10%).

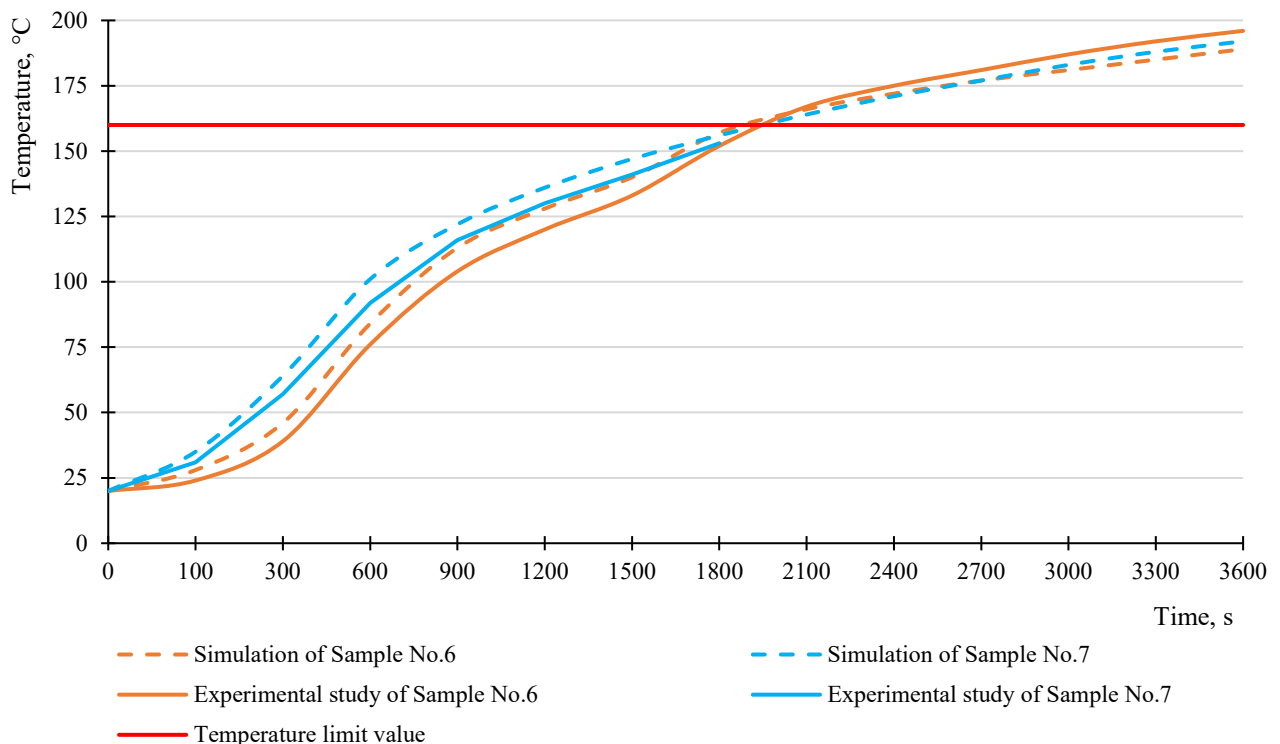


Рис. 12 - Экспериментальные и расчетные температурные кривые образцов №6 и №7 при воздействии стандартного температурного режима
Fig. 12 - Experimental and calculated temperature curves of Samples No.6 and No.7 under standard temperature conditions

Согласно рисунку 12 и результатам экспериментального исследования, получено, что образец №6 является предпочтительным образцом по причине лучшей эластичности,

Gravit, M.; Nedryshkin, O.; Shabunina, D.; Shcheglov, N.; Shinkareva, M.

Fire curtains: models of heat transfer in composite materials;

2023; *Construction of Unique Buildings and Structures*; **109** Article No 10908. doi: 10.4123/CUBS.109.8



способности сворачиваться и разворачиваться в рулон при эксплуатации и обеспечении предела огнестойкости по потере теплоизолирующей способности (I) 30 минут, по потере целостности (E) 60 минут. Образец №7, состоящий из одного слоя аэрогеля толщиной 12 мм, теряет теплоизолирующую способность за 28 минут, по потере целостности (E) 60 минут, при этом полотно не сворачивается в рулон, не эластичное и жесткое.

3.3. Обсуждение / Discussion

При моделировании рассматриваемых образцов противопожарной преграды (образец №1–образец №8) выбраны два перспективных образца для проведения мелкогабаритного исследования – образец №6, содержащий стекловолокно, сетку с интумесцентным составом, фольгированный материал и термоусаженную ткань по краям, образец №7, состоящий из 1 слоя аэрогеля и термоусаженной ткани по краям. Данные образцы выбраны по температурным зависимостям на необогреваемым сторонах образцов, полученных методом моделирования и демонстрирующие предполагаемые пределы огнестойкости E60 (по потере целостности) и I30 (по потере теплоизолирующей способности).

Маломасштабные испытания для образцов №6 и №7 показали хорошую корреляцию с температурными кривыми, полученными методом моделирования, и подтвердили предел огнестойкости E60 и I30 для образца №6. Образец №7, состоящий из одного слоя аэрогеля толщиной 12 мм, потерял целостность (параметр E) на 28-й минуте огневого испытания.

При проведении маломасштабного испытания выявлено, что при разработке крупногабаритного образца необходимо отдавать предпочтение более эластичному образцу для улучшения возможности сворачиваться и разворачиваться в рулон при эксплуатации.

4 Заключение / Conclusions

Разработка противопожарных преград в зданиях и сооружениях требует решения ряда задач: создание негорючих, термостойких материалов с высокими прочностными свойствами, разработка инженерных решений для достижения конструкциями с такими материалами необходимого предела огнестойкости.

На основе результатов моделирования и маломасштабных экспериментов сделаны следующие выводы:

1. В условиях реальной эксплуатации трансформируемые противопожарные шторы по типу штор, толщиной 20–50 мм функционально не отличаются от рулонных ворот, в связи с чем встает вопрос о целесообразности такого инженерного решения. Реальным интересом со стороны рынка пользуются прототипы толщиной полотна 5–10 мм, но модели, построенные по их образу в ПК Elcut не обладают потенциалом для испытаний на EI 60.

2. Перспективно рассматривать полотна с композицией из материалов с очень низкой теплопроводностью и применением терморасширяющегося слоя, который геометрически увеличит толщину теплоизоляции при огневом воздействии. При этом, такое полотно не будет являться негорючим.

3. Маломасштабные испытания для образцов с интумесцентным составом и аэрогелем показали хорошую корреляцию с температурными кривыми, полученные методом моделирования и подтвердили предел огнестойкости E60 и I30 для образца с терморасширяющимся слоем (образец №6). Полотно, состоящее из одного слоя аэрогеля толщиной 12 мм, потеряло целостность на 28-й минуте огневого испытания, возможно, такой результат зависит от некачественного образца, поскольку теплоизоляционные характеристики аэрогеля достаточно высоки. Тем не менее, его также не стоит рассматривать как слой полотна ввиду его малой сжимаемости и неэластичности.

5 Финансирование / Fundings

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 23–29–00618, <https://rscf.ru/project/23-29-00618/>.

The research was funded by the Russian Science Foundation (RSF) under Grant No. 23-29-00618, <https://rscf.ru/project/23-29-00618/>.

References

Gravit, M.; Nedryshkin, O.; Shabunina, D.; Shcheglov, N.; Shinkareva, M. Fire curtains: models of heat transfer in composite materials; 2023; *Construction of Unique Buildings and Structures*; **109** Article No 10908. doi: 10.4123/CUBS.109.8



- 1 Song, Y., Niu, L. and Li, Y. (2019) Combinatorial Spatial Data Model for Building Fire Simulation and Analysis. *ISPRS International Journal of Geo-Information*, **8**.
<https://doi.org/10.3390/ijgi8090408>.
- 2 Yi, X., Lei, C., Deng, J., Ma, L., Fan, J., Liu, Y., Bai, L. and Shu, C.M. (2019) Numerical Simulation of Fire Smoke Spread in a Super High-Rise Building for Different Fire Scenarios. *Advances in Civil Engineering*, **2019**. <https://doi.org/10.1155/2019/1659325>.
- 3 Nedryshkin, O., Gravit, M., Lyapin, A. and Voronin, V. (2016) Overview of Fire Curtains in Construction. *MATEC Web of Conferences*. <https://doi.org/10.1051/mateconf/20168604052>.
- 4 Gao, D., Li, T., Mei, X., Chen, Z., You, S., Wang, Z., Wang, K. and Lin, P. (2020) Effectiveness of Smoke Confinement of Air Curtain in Tunnel Fire. *Fire Technology*, **56**.
<https://doi.org/10.1007/s10694-020-00977-z>.
- 5 Yu, L.X., Liu, F., Beji, T., Weng, M.C. and Merci, B. (2018) Experimental Study of the Effectiveness of Air Curtains of Variable Width and Injection Angle to Block Fire-Induced Smoke in a Tunnel Configuration. *International Journal of Thermal Sciences*, **134**.
<https://doi.org/10.1016/j.ijthermalsci.2018.07.044>.
- 6 Hodžić, N. and Džidić, S. (2018) PROTIVPOŽARNE ZAVJESE I POŽARNA SEKTORIZACIJA U ZGRADAMA. *Zbornik radova Građevinskog fakulteta*, **34**.
<https://doi.org/10.14415/konferencijagfs2018.048>.
- 7 Bjegovic, D., Pecur, I.B., Messerschmidt, B., Milovanovic, B. and Alagusic, M. (2016) Influence of Fire Barriers on Fire Performance of Facades with Combustible Insulation. *MATEC Web of Conferences*, **46**. <https://doi.org/10.1051/mateconf/20164605006>.
- 8 Korolchenko, A.I. and Getalo, D.P. (2015) Fire Curtain (Overview). *Pozharovzryvobezopasnost*, **24**, 56–65. <https://cyberleninka.ru/article/n/protivopozharnye-shtory-obzor>.
- 9 GOST P 53307-2009. *Elements of building constructions. Fire doors and gates. Fire resistance test method*. <https://docs.cntd.ru/document/1200071942>.
- 10 Federal Law No. 123-FZ dated July 22, 2008. "Technical regulations on fire safety requirements" (with amendments and additions). <https://base.garant.ru/12161584/>.
- 11 Hu, W.C., Nurcholik, S.D., Lee, S.K. and Lin, T.H. (2016) Evaluations on Heat Resistance of Curtains with Water Film in a Fire. *Journal of the Chinese Institute of Engineers, Transactions of the Chinese Institute of Engineers, Series A*, **39**. <https://doi.org/10.1080/02533839.2016.1146092>.
- 12 Gravit, M. V., Nedryshkin, O. V. and Ogidan, O.T. (2018) Transformable Fire Barriers in Buildings and Structures. *Magazine of Civil Engineering*, St-Petersburg State Polytechnical University, **77**, 38–46. <https://doi.org/10.18720/MCE.77.4>.
- 13 Eremina, T. and Fadeev, V. (2018) Towards Assessing the Possibility of Implementing Screen Walls at Objects with Massive Occupancy of People. *Pozharovzryvobezopasnost*, **27**, 57–66. <https://cyberleninka.ru/article/n/k-otsenke-vozmozhnosti-vnedreniya-ekrannyh-sten-na-obektah-s-massovym-prebyvaniem-lyudey/viewer>.
- 14 Patent RU187845U1. Multilayer Fabric Convertible Fire Barrier. https://yandex.ru/patents/doc/RU187845U1_20190319.
- 15 Nikitina, M., Ustinov, A., Kiseleva, V. and Babikov, I. (2018) New Fire Retardant Compositions for Fire-Resistant Automatic Curtains. *MATEC Web of Conferences*, EDP Sciences, **245**.
<https://doi.org/10.1051/MATECONF/201824511004>.
- 16 Cunha, D., Fangueiro, R., Bessa, J., Paiva, C., Ribeiro, D., Silva, E., Silveira, D., Soares, D. and Vilarinho, C. (2023) Experimental Thermal Behavior of Fibrous Structures for High-Performance Heat Resistant Fire Curtains. *Energies*, **16**. <https://doi.org/10.3390/en16052426>.
- 17 Zhang, T. and Cao, D. (2021) Simulation Study on the Influence of Fire Partition on Curtain Wall Temperature in Super High-Rise Buildings in China. *Complexity*, **2021**.
<https://doi.org/10.1155/2021/4124049>.
- 18 Li, L., Zhang, H., Xie, Q., Chen, L. and Xu, C. (2012) Experimental Study on Fire Hazard of Typical Curtain Materials in ISO 9705 Fire Test Room. *Fire and Materials*, **36**.
<https://doi.org/10.1002/fam.1089>.
- 19 ELCUT. Modeling of Two-Dimensional Fields by the Finite Element Method. https://elcut.ru/free_doc_r.htm.
- 20 (1991) EN 1991-1-2: Eurocode 1: Actions on Structures - Part 1-2: General Actions - Actions on Structures Exposed to Fire. <https://www.phd.eng.br/wp-content/uploads/2015/12/en.1991.1.2.2002.pdf>.
- 21 Fedyukhin, A. V., Strogonov, K. V., Soloveva, O. V., Solovev, S.A., Akhmetova, I.G., Berardi, U.,

Gravit, M.; Nedryshkin, O.; Shabunina, D.; Shcheglov, N.; Shinkareva, M.

Fire curtains: models of heat transfer in composite materials;

2023; *Construction of Unique Buildings and Structures*; **109** Article No 10908. doi: 10.4123/CUBS.109.8



- Zaitsev, M.D. and Grigorev, D. V. (2022) Aerogel Product Applications for High-Temperature Thermal Insulation. *Energies*, **15**. <https://doi.org/10.3390/en15207792>.
- 22 Tsalagkas, D., Börcsök, Z. and Pásztory, Z. (2019) Thermal, Physical and Mechanical Properties of Surface Overlaid Bark-Based Insulation Panels. *European Journal of Wood and Wood Products*, **77**. <https://doi.org/10.1007/s00107-019-01436-5>.
- 23 Zybina, O. and Gravit, M. (2020) Intumescent Coatings for Fire Protection of Building Structures and Materials. Springer International Publishing, Cham. <https://doi.org/10.1007/978-3-030-59422-0>.
- 24 ISO 834-75. Elements of Building Constructions. Fire-Resistance Test Methods. General Requirements. <https://docs.cntd.ru/document/9055248>.
- 25 GOST 30247.0-94. Elements of building constructions. Fire-resistance test methods. General requirements. <https://docs.cntd.ru/document/9055248>.