

ISSN 2304-6295

# Fire resistance of monolithic reinforced concrete structures of the tall residential building with core structural system

Gravit, M.V.1\*; Nazarov; M.A.2\*\*, Ivanov; V.N.3\*\*\*; Dmitriev; I.I.4\*\*\*\*

<sup>1</sup> Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, St. Petersburg, Russian Federation

<sup>2</sup>LE "Bonava Saint-Petersburg", St. Petersburg, Russian Federation

<sup>3</sup> State Fire Academy of Emercom of Russia, Moscow, Russian Federation

<sup>4</sup>Technische Universitat Graz, Graz, Austria

\* marina.gravit@mail.ru

\*\* mikenazarow95@gmail.com

\*\*\* v.n.ivanov.pbs@ya.ru

\*\*\*\* i.i.dmitriev@yandex.ru

#### Keywords:

High-rise residential building; Fire resistance; Fire load; Thermal regime; Required fire resistance limits

### Abstract:

The key requirements of building codes for the bearing structures fire safety of high-rise buildings were identified. Heat-transfer and structural calculations were carried out for reinforced concrete monolithic pylon and floor slab of the building. Three different fire curves were implemented – the standard one and two real ones. It was established that for high-rise residential buildings a fire resistance limits of its structures should be determined based on the modern data about a fire load in the living units. This will lead to more cost-efficient building practice.

# 1 Introduction

Высотные жилые здания, строительство которых оправдывается высокой стоимостью земли в условиях плотной городской застройки, имеют повышенные риски возникновения пожара [1].

В соответствии с Федеральным законом Российской Федерации «Технический регламент о требованиях пожарной безопасности» от 22.07.2008 N 123-ФЗ (далее – Технический регламент), основной регламентируемой характеристикой, определяющей способность зданий и сооружений сопротивляться пожару, является его степень огнестойкости. Она, в свою очередь, для жилых зданий определяется классом функциональной пожарной опасности, высотностью и площадью этажа в пределах пожарного отсека.

Согласно требованиям Технического регламента и с учётом:

- табл. 9.1 СП 267.1325800.2016 «Здания и комплексы высотные. Правила проектирования» (Russian Federation applicable Code Design SP 267.1325800.2016 "High rise buildings and complexes. Design rules"),
- вступающим в силу с 30 июля 2020 года СП 477.1325800.2020 «Здания и комплексы высотные. Требования пожарной безопасности» (Russian Federation applicable Code Design SP 477.1325800.2020 "Highrise buildings and complexes. Fire safety requirements")

зданиям свыше 150 метров присваивается первая степень огнестойкости с повышенными требуемыми пределами огнестойкости по несущей способности R240 [2].

Пределы огнестойкости определяют в мировой практике с учётом расчётноэкспериментальных подходов в режиме температурной кривой «стандартного» пожара (ISO 834:1975 «Fire Resistance Tests – Elements of Building Construction»). Понятие предела огнестойкости не применимо на воздействие пожара с «реальным» температурным режимом, для них применяется альтернативное понятие - момент потери (утраты) конструкцией огнестойкости

Fire resistance of monolithic reinforced concrete structures of the tall residential building with core structural system; 2020; *Construction of Unique Buildings and Structures;* Volume **90** Article No 9004. doi:10.18720/CUBS.90.4

по несущей способности. Под «реальным» температурным режимом подразумевается режим, отличный от «стандартного» [2-6] полученный с помощью компьютерного моделирования при уточненных значениях пожарной нагрузки и ее распределения в объёме помещений [7-8].

Согласно ГОСТ 30247.0-94 «Конструкции строительные. Методы испытаний на огнестойкость» (Russian Federation State Standard GOST 30247.0-94 "Elements of building constructions. Fire-resistance test methods. General requirements") в России для определения огнестойкости строительных конструкций используют экспериментальные и расчётные методы.

Проведение натурных испытаний конструкций статически-неопределимых монолитных железобетонных зданий невозможно по ряду причин [10]:

- на огневых стендах невозможно воспроизвести жесткое сопряжение элементов конструкций, испытания проводятся только для случаев шарнирного опирания;

- на огневых установках невозможно воссоздать расчётные значения внутренних усилий в бетоне и арматуре;

- исчерпание предела огнестойкости шарнирно-опертых и жестких монолитных конструкций происходят по принципиально различным схемам.

Результаты огневых испытаний сборных, шарнирно-опертых конструкций, в свою очередь недопустимо переносить на монолитные конструкции с жесткими узлами сопряжения. Существуют также расчетные и экспериментальны данные по пределам огнестойкости различных конструктивных элементов, которые могут встречаться в высотных жилых зданиях [11]–[15], однако эти данные могут быть ограничено использованы при оценке огнестойкости всего высотного здания.

Рекомендованные расчетные методики определения огнестойкости конструкций из железобетона изложены в СТО 36554501-006-2006 «Правила по обеспечению огнестойкости и огнесохранности железобетонных конструкций» (Standard of Federal State Unitary Enterprise "Research Center Construction" STO 36554501-006-2006 "Rules for ensuring fire resistance and fire safety of reinforced concrete structures"). Далее в тексте статьи этит документ именуется СТО. Рекомендуемые этим документом методики состоят из статического и теплотехнического расчетов.

<u>Теплотехнической расчёт</u> производится для определения температур прогрева сечений элементов конструкций во времени.

При использовании «стандартного» температурного режима существуют готовые решения теплотехнической задачи для большего числа типовых железобетонных конструкций. Недостаток данного подхода в том, что номенклатура рассматриваемых конструкций не является исчерпывающей [3, 10, 11]. Многие нестандартные задачи не рассматриваются, что существенно ограничивает область применения данного подхода. К тому-же, как показывают различные исследования, «стандартный» температурный режим для гражданских зданий зачастую является более «жёстким», чем «реальный» [2, 3, 12–15]. Это приводит к завышению требуемых пределов огнестойкости и неоправданно большим финансовым потерям для ее обеспечения.

<u>Статический расчет</u> предполагает проверку по прочности и устойчивости конструкций при совместном действии эксплуатационной нагрузки и высокой температуры.

Использование программных комплексов для расчёта огнестойкости конструкций при различных режимах пожара пока вызывает определенные трудности по ряду причин [16, 17, 26, 18–26] Существуют расчётные комплексы (например, Sofistik и ANSYS), в которых реализована возможность выполнения теплотехнической части расчёта при пользовательском («реальном») температурном режиме, однако, не реализована статическая часть. В других программных комплексах (например, NormCAD), заложена возможность выполнения теплотехнической и статической задач, однако, только для «стандартного» режима пожара. В программном комплексе ЛИРА-САПР 2019 реализована возможность подбора армирования несущих конструкций с учётом заданного предела огнестойкости, в том числе для пользовательского температурного режима пожара. Однако, полученные таким образом результаты еще подлежат проверке и верификации, поскольку данная возможность введена совсем недавно, и у проектировщиков еще нет какоголибо опыта её использования.

<u>Цель данного исследования</u> – определить огнестойкость несущих железобетонных конструкций высотных жилых зданий каркасно-ствольной конструктивной системы при «реальном» режиме пожара, используя данные по пожарной нагрузке в жилой части здания.

# 2 Methods

Для высотных жилых зданий определялся наиболее опасный сценарий развития пожара, при котором наиболее основные несущие конструкции могу оказаться под воздействием пожара. Выполнен статический расчёт здания в целом на действие проектных нагрузок, определено напряженно-деформированное состояние несущих конструкций, подобраны сечения и армирование, обеспечивающее работоспособность по I и II группам предельных состояний. Выполнен теплотехнический и статический расчёт основных несущих конструкций при «стандартном» и двух «реальных» температурных режимах пожаров в квартирах высотных жилых зданий, полученных в [4].

Принципиальные архитектурные, конструктивные и объёмно-планировочные решения рассматриваемого высотного жилого здания были приняты согласно проекту жилого здания (небоскреба) «One Tower» в «Москва-Сити» (Москва, Российская Федерация) находящегося в данный момент на стадии разработки проектной документации.



Рисунок 1. Конструктивная модель здания Fig. 1. Structural model of the building

Gravit, M.V., Nazarov, M. A., Ivanov, V.N., Dmitriev, I.I.



Рисунок 2. План вертикальных несущих конструкций на отметке +133.500 Fig. 2. Vertical bearing structures plan at elevation +133.500

Вертикальные несущие конструкции представлены центральным лестнично-лифтовым узлом (центральное ядро жесткости), а также пилонами и колоннами, расположенными по периметру. Стены ядра толщиной 200...800 мм выполнены из бетона класса В40. Пилоны длиной 3000 мм и толщиной 200, 300 и 400 мм (сечение изменяется по высоте здания) выполнены из бетона класса В40. Колонны – круглые диаметром 800 мм, бетон класса В40. Горизонтальные плиты перекрытий – монолитные безбалочные, толщиной 280 мм, выполнены из бетона класса В25.

Таблица 1. Основные	характеристики рассматриваемого здания
Table 1. Main	characteristics of the building

Назначение	Жилое
Район строительства	г. Москва
Количество надземных этажей	42
Высота надземного этажа	3.6 м
Количество подземных этажей	3
Высота подземного этажа	3.15 м
Высота	156.3 м
Требуемый предел огнестойкости несущих конструкций	R240

Рассмотрена возможность возникновения пожара в одной из квартир. Причём расположение квартиры с очагом пожара по высоте жилых зданий не принципиально ввиду того, что развитие пожара будет проходить по тем же физико-химическим процессам, и «реальные» температурные режимы принимаются идентичными без учёта ветрового воздействия и распространения пожара по фасаду жилых зданий. При этом несущие пилоны, а также плита перекрытия могут оказаться под воздействием температурной нагрузки. В зависимости от расположения пилона в плане этажа, возможны сценарии как с односторонним нагревом (в случае, когда он отделяет одну квартиру от другой) так и с трёхсторонним (если он расположен в пределах одной квартиры).



Рисунок 3. Рассматриваемые сценарии пожара Fig. 3. Supposed fire scenario

Для массивных вертикальных несущих конструкций данного высотного жилого здания, работающих преимущественно на сжатие, наиболее опасно будет трёхстороннее огневое воздействие (поскольку четырёхсторонний нагрев невозможен), которое будет быстрее всего уменьшать полезную площадь сечения. При выходе из работы внешних, нагретых выше критической температуры слоев бетона, напряжения в центральной части сечения растут. Когда напряжения достигают значения предела прочности бетона, конструкция теряет свою несущую способность. Предел огнестойкости плиты перекрытия при пожаре наступает вследствие прогрева растянутой арматуры. Из-за уменьшения её предела текучести, в какой-то момент в пролетной части образуется «пластический шарнир» и перекрытие разрушается. Нагрев сжатой арматуры оказывает куда меньшее влияние на несущую способность, и зачастую им можно пренебречь. (в соответствии с СТО и «пособием по определению пределов огнестойкости конструкций, пределов распространения огня по конструкциям и групп возгораемости материалов» ЦНИИСК им. Кучеренко Госстроя СССР 1985).

Расчёт был выполнен для:

- 1) Пилонов толщиной 200, 300 и 400 мм, подверженных одностороннему нагреву;
- 2) Пилонов толщиной 200,300 и 400 мм, подверженных трёхстороннему нагреву;
- 3) Пролётного участка плиты перекрытия, находящегося над очагом пожара.

При это в качестве рассматриваемых были выбраны эквивалентно нагруженные пилоны (с одинаковым начальным коэффициентом использования по несущей способности) разного сечения, расположенные на разных высотных отметках.



Fig. 4. Equally loaded pylons.

Конструктивная модель несущего железобетонного каркаса высотного жилого здания была построена в Autodesk Revit 2020. Модель включает в себя информацию о геометрии и сечениях конструкций, материалах, а также нагрузках.

Аналитическая модель здания с нагрузками была импортирована в расчетный комплекс ЛИРА-САПР 2019. После задания оставшихся исходных данных выполнен статический расчёт, определено напряженно-деформированное состояние, подобрано армирование рассматриваемых конструкций, обеспечивающее работоспособность по I и II группам предельных состояний (прочности, трещиностойкости и предельным деформациям).



Рисунок 5. Схема армирования рассматриваемых пилонов (справа) и плиты перекрытия (слева) Fig. 5. Reinforcement of pylon (right) and floor slab (left)

<u>Теплотехнический расчёт</u> был выполнен по «стандартной» и двум «реальным» (рис. 6 и 7) температурным кривым для моментов времени 0, 30, 60, 90, 120, 150, 180 и 240 минут в ПК «Sofistik 2020» с учётом уточнённых в [4] температурных режимах «реального» пожара.

В [4] произведено численное моделирование пожара в квартирах высотного жилого здания с использованием Fire Dynamics Simulator. При этом заданная пожарная нагрузка была максимально приближена по составу и распределению по площади к реальным нагрузкам в жилых квартирах. В результате, для двух-, трёх-, четырёхкомнатных квартир был получен набор температурных кривых, существенно отличающихся от «стандартной». Данные кривые соответствуют свободному распространению пожара без вмешательства автоматических систем пожаротушения и действий пожарных подразделений. Режим, полученный по максимальным пиковым значениям температур каждого из режимов – это наиболее критичный <u>«реальный» температурный режим</u>, по которому предлагается производить расчёт огнестойкости конструкций высотных жилых зданий (рис. 6). Также автором были получены температурные кривые, соответствующие сценариям развития пожара с действующими системами активной противопожарной защиты: автоматического пожаротушения и дымоудаления (рис. 7).

Gravit, M.V., Nazarov, M. A., Ivanov, V.N., Dmitriev, I.I. Fire resistance of monolithic reinforced concrete structures of the tall residential building with core structural system; 2020; *Construction of Unique Buildings and Structures;* Volume **90** Article No 9004. doi:10.18720/CUBS.90.4



<u>Статический расчёт</u> пилонов был выполнен в соответствии с п. 8.12 СТО и СП 63.13330.2018 «Бетонные и железобетонные конструкции. Основные положения», как конструкций, работающих на внецентренное сжатие с малым эксцентриситетом приложения нагрузки и малым значением гибкости. Статический расчёт плиты был выполнен в соответствии с п. 8.3 СТО и СП 63.13330.2018 «Бетонные и железобетонные конструкции. Основные положения», как для изгибаемого элемента.

## 3 Results and Discussion

Результаты теплотехнического расчета для трехстороннего нагрева приведены в табл. 2, для трехстороннего – в табл. 3.

Gravit, M.V., Nazarov, M. A., Ivanov, V.N., Dmitriev, I.I.



Рисунок 8. Температурные поля в сечении пилона при трехстороннем нагреве и «стандартном» режиме пожара на 240 минуте

Fig. 8. Temperatures in the pylon cross-section in case of 3-sides fire exposure with a standard thermal regime after 240 minutes

	°Ø <sup>17</sup>	Ø <sup>18</sup>	Ø <sup>19</sup>	Ø <sup>20</sup>	Ø <sup>21</sup>	8	Ø <sup>23</sup>	<sup>5.8</sup> Ø <sup>24</sup>	5.8 Ø <sup>25</sup>	Ø	Ø <sup>27</sup>	Ø <sup>28</sup>	Ø <sup>29</sup>	30 30	031	49Ø <sup>323</sup>
10	Ø <sup>33</sup>			131.0	131.0	131.0 131.0	131.0	200. 131.0	0	131.0	131.0	131.0				Ø <sup>34, j</sup>
	Ø	Ø	Ø 385	5.80 <sup>4</sup> 3	85.80 <sup>5</sup>	3.00.8	Ø5.8	8 3Ø.8	300.0 9 38Ø8	385Ø <sup>10</sup>	3.Ø <sup>11</sup>	12 3ۯ.8	Ø <sup>13</sup>	Ø	Ø	497 g <sup>16</sup>

Рисунок 9. Температурные поля в сечении пилона при трехстороннем нагреве и «реальном» режиме пожара на 240 минуте

Fig. 9. Temperatures in the pylon cross-section in case of 3-sides fire exposure with a real thermal regime after 240 minutes



Рисунок 10. Температурные поля в сечении пилона при одностороннем нагреве и «стандартном» режиме пожара на 240 минуте

Fig. 10. Temperatures in the pylon cross-section in case of 1-sides fire exposure with a standard thermal regime after 240 minutes

23.5	<b>O</b> <sup>18</sup>	<b>0</b> <sup>19</sup>	Ø <sup>20</sup>	25.2 21	25.4 22	23 <sup>25</sup>	24 24	<b>0</b> <sup>25</sup>	<sup>4</sup> 2 <sup>2</sup> 26	25.4 27	Ø <sup>28</sup>	<b>0</b> <sup>29</sup>	Ø <sup>30</sup>	Ø <sup>B1</sup>	<sup>2</sup> 32
Ø <sup>33</sup>							100.0					100.(			Ø <sup>34</sup>
$o^1$	Ø	Ø <sup>3</sup> 383	a.₅Ø <sup>4</sup> 3	5 83.50	3Ø5	Ø3.5	3 <mark>8.0</mark> 0.5	9 31Ø5	383Ø <sup>10</sup>	3Ø₅	3Ø5	13 a.(	Ø <sup>14</sup>	Ø <sup>15</sup>	o <sup>16</sup>

Рисунок 11. Температурные поля в сечении пилона при одностороннем нагреве и «реальном» режиме пожара на 240 минуте Fig. 11. Temperatures in the pylon cross-section in case of 1-sides fire exposure with a real thermal regime after 240 minutes

Таблица 2. Результаты теплотехнического расчета при трехстороннем нагреве
Table 2. Thermal analysis results with a 3-side fire exposure

МИЖ	1Я, МИН	раб	Гемпе очей а <sup>0</sup> 1	ратура армату С	а /ры,	Коз	эффиц табл	иент g ı. 5.5	ѕ ПО	Глубина прогрева бетона до критической температуры (500 <sup>0</sup> C), мм				
əd	Bpen	плита 280 мм	пилон 200 мм	пилон 300 мм	пилон 400 мм	плита 280 мм	пилон 200 мм	пилон 300 мм	пилон 400 мм	плита 280 мм	пилон 200 мм	пилон 300 мм	пилон 400 мм	
_	0	-	20	20	20	-	1,00	1,00	1,00	-	0	0	0	
M	30	-	77	76	76	-	1,00	1,00	1,00	-	10	10	10	
ежи	60	-	196	190	190	-	1,00	1,00	1,00	-	0	0	0	
й р	90	-	217	201	200	-	1,00	1,00	1,00	-	0	0	0	
НЫ	120	-	233	204	201	-	1,00	1,00	1,00	-	0	0	0	
аль	150	-	252	210	205	-	1,00	1,00	1,00	-	0	0	0	
Ре	180	-	251	199	192	-	1,00	1,00	1,00	-	0	0	0	
	240	-	200	154	146	-	1,00	1,00	1,00	-	0	0	0	
2	0	-	20	20	20	-	1,00	1,00	1,00	-	0	0	0	
MM	30	-	90	90	89	-	1,00	1,00	1,00	-	10	10	10	
ежі	60	-	224	216	211	-	1,00	1,00	1,00	-	23	23	23	
lň p	90	-	328	307	305	-	0,96	0,99	1,00	-	35	27	25	
ЧΗΡ	120	-	425	378	356	-	0,79	0,88	0,92	-	46	38	37	
ал	150	-	485	413	406	-	0,64	0,82	0,85	-	50	35	35	
P	180	-	517	425	414	-	0,56	0,79	0,81	-	65 50	30	30	
	240	-	495	307	201	-	0,01	0,07	0,93	-	50	0	0	
Σ	0	-	20	20	20	-	1,00	1,00	1,00	-	0	0	0	
ИЖе	30	-	126	125	125	-	1,00	1,00	1,00	-	11	11	11	
йр	60	-	256	246	246	-	1,00	1,00	1,00	-	21	21	21	
IIAH IIA	90	-	363	336	333	-	0,91	0,95	0,95	-	32	32	32	
apı	120	-	459	404	399	-	0,70	0,84	0,85	-	40	40	39	
дне	150	-	541	461	452	-	0,51	0,70	0,72	-	60	46	44	
Ста	180	-	612	512	498	-	0,35	0,57	0,60	-	80	52	49	
	240	-	731	603	573	-	0,18	0,37	0,43	-	100	63	59	

Gravit, M.V., Nazarov, M. A., Ivanov, V.N., Dmitriev, I.I. Fire resistance of monolithic reinforced concrete structures of the tall residential building with core structural system; 2020; *Construction of Unique Buildings and Structures;* Volume **90** Article No 9004. doi:10.18720/CUBS.90.4

Таблица 3. Результаты теплотехнического расчета при одностороннем нагре	ве
Table 3. Thermal analysis results with a 1-side fire exposure	

МИЖ	ія, мин	раб	Гемпе очей а <sup>о</sup>	ратура армату С	а /ры,	Коз	ффиц табл	иент <u>g</u> 1. 5.5	Глубина прогрева бетона до критической температуры (500 <sup>0</sup> С), мм				
Ре	Bpen	плита 280 мм	им 002 ногип	пилон 300 мм	пилон 400 мм	плита 280 мм	пилон 200 мм	пилон 300 мм	пилон 400 мм	плита 280 мм	пилон 200 мм	пилон 300 мм	пилон 400 мм
	0	20	20	20	20	1,00	1,00	1,00	1,00	-	0	0	0
M 1	30	137	76	76	76	1,00	1,00	1,00	1,00	-	10	10	10
лжө	60	259	190	190	190	1,00	1,00	1,00	1,00	-	0	0	0
йр	90	240	200	200	200	1,00	1,00	1,00	1,00	-	0	0	0
НЫ	120	233	201	201	201	1,00	1,00	1,00	1,00	-	0	0	0
аль	150	234	204	204	205	1,00	1,00	1,00	1,00	-	0	0	0
Ре	180	202	191	191	192	1,00	1,00	1,00	1,00	-	0	0	0
	240	139	145	144	146	1,00	1,00	1,00	1,00	-	0	0	0
5	0	20	20	20	20	1,00	1,00	1,00	1,00	-	0	0	0
ММ	30	156	90	90	89	1,00	1,00	1,00	1,00	-	10	10	10
ежі	60	324	217	217	211	0,96	1,00	1,00	1,00	-	23	23	23
ій р	90	420	305	306	305	0,80	0,99	0,99	1,00	-	27	27	25
рНЬ	120	491	374	374	356	0,62	0,89	0,89	0,92	-	38	38	37
еал	150	490	400	405	400	0,01	0,04	0,04	0,00	-	35	30 30	30 30
ď	240	376	360	357	361	0,00	0,02	0,02	0,01	_	10	10	0
	0	20	20	20	20	1 00	1 00	1 00	1 00	-	0	0	0
ИМ	30	210	125	125	125	1,00	1,00	1,00	1,00	_	11	11	11
ежі	60	360	246	246	246	0.91	1,00	1,00	1,00	_	21	21	21
iň p	90	455	270	270	270	0,72	0.95	0.95	0.95	_	30	32	32
ТНЬ	120	524	300-	398	300	0.54	0.85	0.85	0.85	-	38	<u>4</u> 0	39
дар	150	570	453	<u>451</u>	452	0.42	0.72	0,00	0,00	-	43	40 45	<u></u> <u></u>
ган,	180	624	400 408	406	402	0,72	0.61	0.61	0.60	-	50		<del></del> 40
Ö	240	607	572	568	-30 573	0.22	0.43	0 44	0.43	-	56	50	
	2 10	001	012	000	010	0,22	0,70	5,77	0,10		00	00	00

Gravit, M.V., Nazarov, M. A., Ivanov, V.N., Dmitriev, I.I.

Выполнен статический расчёт на огнестойкость (на утрату огнестойкости по несущей способности – для «реальных» режимов) рассматриваемых пилонов и плиты и определён коэффициент использования несущей способности для трёх режимов пожара и моментов времени 0, 30, 60, 90, 120, 150, 180 и 240 минут (рис. 11).



Gravit, M.V., Nazarov, M. A., Ivanov, V.N., Dmitriev, I.I.



Gravit, M.V., Nazarov, M. A., Ivanov, V.N., Dmitriev, I.I.



Рисунок 11. Результаты расчета огнестойкости Fig. 11. Results of fire-resistance calculation

По полученным графикам можно сделать вывод о том, что оба «реальных» температурных режима пожара являются существенно более «мягкими», чем «стандартный». Особенно сильно различия видны после 150 минут, когда при «реальных» режимах бетон и арматура уже начинают остывать, а при «стандартном» – продолжают нагреваться вплоть до 240 минуты.

До 120 минуты расхождение значений остаточной несущей способности между «стандартным» и «реальный» режимами при свободном распространении огня не превышает для пилонов – 10%, для плиты – 11%.

К 150 минуте начинается фаза затухания при «реальном» режиме со свободным распространением, в то время как при режиме «стандартном» температуры продолжают расти. Поэтому в промежутке от 120 до 240 минут остаточные несущие способности пилонов и плит при «стандартном» и «реальных» становятся несопоставимыми.

По полученным графикам значений коэффициентов использования несущей способности хорошо видно, что после 120 минуты пожара «стандартный» и «реальный» режимы дают существенные отличия. Обоснованное использование «реальных» режимов при проектировании пожарной безопасности высотных жилых зданий может в перспективе дать положительный экономический эффект, снижая материалоемкость.

Нужно понимать, что полученные начальные коэффициенты использования несущей способности (0,5 – для пилона и 0,32 – для плиты) вычислены в результате расчёта только по I группе предельных состояний и на действие только постоянных и временных длительных нагрузок, взятых с коэффициентами надёжности γ<sub>f</sub>=1, как это предложено в методике СТО. То есть рассматривается напряженно-деформированное состояние конструкций при наиболее вероятном сочетании внешних воздействий. В случае же расчёта проектного армирования в ЛИРА-САПР с учетом требований по второй группе предельных состояний, кратковременных нагрузок и коэффициентов надёжности в соответствии с СП 20.13330.2016 «Нагрузки и воздействия» (Russian Federation applicable Code Design SP 20.13330.2016 "Loads and actions"), коэффициенты использования этих конструкций были близки к единице. По этой причине, в случае развития пожара при отсутствии дополнительных маловероятных негативных воздействиях (максимальное значение ветровой нагрузки, иногда – сейсмическое воздействие и др.) существует запас по несущей способности.

Для плиты перекрытия запас несущей способности при наиболее вероятном сочетании внешних воздействий предотвратил бы ее разрушение при «реальных» температурных режимах. Однако при «стандартном» температурном режиме, предел огнестойкости все же наступил бы на 180 минуте.

При сравнении результатов расчета эквивалентно загруженных пилонов разного сечения можно сделать вывод о том, что более «массивные» вертикальные конструкции являются более

Fire resistance of monolithic reinforced concrete structures of the tall residential building with core structural system; 2020; *Construction of Unique Buildings and Structures;* Volume **90** Article No 9004. doi:10.18720/CUBS.90.4

устойчивыми к огневому воздействию. В частности, пилон толщиной 400 мм не исчерпывает своего предела огнестойкости даже к 240 минуте, тогда как для пилона толщиной 200 мм этот предел наступает: на 135 минуте – при «стандартном» режиме пожара, на 150 минуте – при «реальном» режиме со свободным развитием.

При это видно, что для изгибаемого элемента – плиты перекрытия, воздействие высоких температур более критично, чем для сжатых вертикальных пилонов. Это объясняется, в первую очередь, различием в работе конструкций. В изгибаемых плитах восприятие нагрузок происходит благодаря рабочей арматуре в растянутой зоне, которая располагается, по конструктивным соображениям, на расстоянии 25-40 мм от грани плиты и поэтому уязвима при пожаре.

## 4 Conclusions

Очевидно, «стандартный» температурный режим в некоторых случаях и для определенных классов функциональной пожарной опасности требует обоснованного пересмотра. Это позволит уйти от чрезмерно высокого запаса по несущей способности в сторону более экономичного строительства.

Определение требуемых пределов огнестойкости следует выполнять с учетом действительной реальной пожарной нагрузки на объектах и через эквивалентную продолжительность пожара с коэффициентом огнестойкости (запаса на неопределённость).

Дальнейшими исследованиями следует также учесть фактор влияния высоты на обоснование требуемых пределов огнестойкости в связи с изменением нагрузок на несущие конструкции.

Также актуально рассмотрение особенностей воздействия пожара на несущие конструкции зданий других конструктивных схем и различающихся объёмно-планировочных решений.

## References

1. Kuznetsova, I.S. Gravit, M.V. Zimin, S.S. Serdobintsev, R.M. Normirovaniye ognestoykosti i identifikatsiya stroitelnykh konstruktsiy [fire resistance rating and identification of building structures]. Pozhary i chrezvychaynyye situatsii: predotvrashcheniye, likvidatsiya. 2019. 4. Pp. 28–38. (rus)

2. Roytman, V.M., Firsova, T.F. Neobosnovannoye zavysheniye trebovaniy norm i STU po predelam ognestoykosti ryada konstruktsiy vysotnykh zdaniy [unreasonable overestimation of the requirements of standards on the fire resistance limits of a number of structures of high-rise buildings]. Stroitelnyye normy. 2017. 2. Pp. 59–62. (rus)

3. Ivanov, V.N. Kompleksnyy podkhod k opredeleniyu trebuyemykh predelov ognestoykosti vysotnykh zhilykh zdaniy [an integrated approach to deterimining of required fire risistance limits of residential buildings]. Pozhary i chrezvychaynyye situatsii: predotvrashcheniye, likvidatsiya. 2018. 1. Pp. 28–38. DOI:10.25257/fe.2018.1.28-38. (rus)

4. Molchadskiy, I.S. Pozhar v pomeshchenii [fire in the room]. Moskva: VNIIPO, 2005.317p. (rus)

5. Ivanov, V.N. Solntsev, N.D. Pozharnaya nagruzka v kvartirakh v vysotnykh zhilykh zdaniyakh [Fire load in apartments in high-rise residential buildings]. Pozhary i chrezvychaynyye situatsii: predotvrashcheniye, likvidatsiya. 2019. 4. Pp. 39–49. DOI:10.25257/fe.2019.4.39-49. (rus)

6. Ma, Q., Guo, W. Discussion on the fire safety design of a high-rise building. 2012 International Symposium on Safety Science and Technology. 2012. 45(3). Pp. 685–689. DOI:10.1016/j.proeng.2012.08.223.

7. Gravit, M., Lyulikov, V., Fatkullina, A. Possibilities of modern software complexes in simulation fire protection of constructions structures with Sofistik. MATEC Web of Conferences. 2018. 193. Pp. 0-4. DOI:10.1051/matecconf/201819303026.

8. Seung H. Kim, K.Y.H. Assessment of the finite-volume method and the discrete ordinate method for radiative heat transfer in a three-dimensional rectangular enclosure. Numerical Heat Transfer, Part B: Fundamentals. 1999. 35(1). Pp. 85–112. DOI:10.1080/104077999276027.

9. Kuznetsova, I.S., Ryabchenkova, V.G. Protivopozharnyye normy - osnova pozharnoy bezopasnosti zdaniy i sooruzheniy [fire safety standards - the basis of fire safety of buildings and structures]. Promyshlennoye i grazhdanskoye stroitelstvo. 2017. 1. Pp. 35–38. (rus)

10. Belov, V.V., Semenov, K.V., Renev, I.A. Ognestoykost zhelezobetonnykh konstruktsiy: Modeli i metody rascheta [Fire Resistance of Reinforced Concrete Structures: Models and Calculation Methods]. Magazine of civil engineering. 2010. 6. Pp. 58–61. (rus)

Fire resistance of monolithic reinforced concrete structures of the tall residential building with core structural system; 2020; *Construction of Unique Buildings and Structures;* Volume **90** Article No 9004. doi:10.18720/CUBS.90.4

11. Roytman, V.M., Pristupyuk, D.N. Osobennosti otsenki stoykosti zdaniy i sooruzheniy iz zhelezobetonnykh konstruktsiy pri kombinirovannykh osobykh vozdeystviyakh s uchastiyem pozhara [Features of assessing the durability of buildings and structures made of reinforced concrete structures under combined special effects involving fire]. Pozharovzryvobezopasnost. 2010. 19(7). Pp. 29–38. (rus)

12. Roytman, V.M. Normirovaniye zashchity vysotnykh zdaniy protiv progressiruyushchego razrusheniya pri kombinirovannykh osobykh vozdeystviyakh [Rationing of protection of high-rise buildings against progressive collapse under combined loads]. Sovremennoye promyshlennoye i grazhdanskoye stroitelstvo. 2008. 4(1). Pp. 11–19. (rus)

13. Xie, P., Abu, A., Spearpoint, M. Comparison of Existing Time-Equivalence Methods and the Minimum Load Capacity Method. Fire Science and Technology 2015. 17. Pp. 263–271. DOI:10.1007/978-981-10-0376-9\_26.

14. Tonicello, E., Vassart, O., Zanon, R., Franssen, J.M. Structural fire design and optimisation of a building. Structural Engineering International: Journal of the International Association for Bridge and Structural Engineering (IABSE). 2012. 22(4). Pp. 541–544. DOI:10.2749/101686612X13363929517776.

15. Gravit, M. V., Terekh, M.D., Lyulikov, V.A., Svintsov, S.A. Software packages for calculation of fire resistance of building construction, including fire protection. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2018. 456(1). Pp. 1–7. DOI:10.1088/1757-899X/456/1/012016.

16. Schaumann, P., Kirsch, T. Protected Steel and Composite Connections. Journal of Structural Fire Engineering. 2015. 6(1). Pp. 41–48. DOI:10.1260/2040-2317.6.1.41.

17. Kraus, P., Mensinger, M., Schaumann, P. Investigations of steel elements with intumescent coating connected to space-enclosing elements in fire, Fire tests on intumescent coated steel members. Applications of Structural Fire Engineering. 2015. 1(3). Pp. 56–76.

18. Bączkiewicz, J., Pajunen, S., Malaska, M., Heinisuo, M. Parametric study on temperature distribution of square hollow section joints. Journal of Constructional Steel Research. 2019. 160. Pp. 490–498. DOI:10.1016/j.jcsr.2019.05.049.

19. Bączkiewicz, J., Malaska, M., Pajunen, S., Alanen, M., Heinisuo, M. Experimental study on axially loaded square hollow section T-joints under fire conditions. Fire Safety Journal. 2020. 114. Pp. 679–692. DOI:10.1016/j.firesaf.2020.102993.

20. Ilyin, N.A., Panfilov, D.A., Komov, E.M. Estimation of Fire Resistance of a Building Structure by the Criterion of Heat-Insulating Ability. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2018. 463(4). Pp. 8–17. DOI:10.1088/1757-899X/463/4/042024.

21. Zhang, G., Zhou, X., Zhu, G., Yan, S. A new accident analysis and investigation model for the complex building fire using numerical reconstruction. Case Studies in Thermal Engineering. 2019. 14. Pp. 153–178. DOI:10.1016/j.csite.2019.100426.

22. Zhang, D., Zhang, J., Xiong, H., Cui, Z., Lu, D. Taking advantage of collective intelligence and BIM-based virtual reality in fire safety inspection for commercial and public buildings. Applied Sciences (Switzerland). 2019. 9(23). Pp. 156–178. DOI:10.3390/app9235068.

23. Machado, L.R., Dutra, V.F.P., Maghous, S. A limit analysis approach to the stability assessment of reinforced concrete panels in fire conditions. Latin American Journal of Solids and Structures. 2020. 17(1). Pp. 543–559. DOI:10.1590/1679-78255662.

24. Čolić, A., Pečur, I.B. Influence of Horizontal and Vertical Barriers on Fire Development for Ventilated Façades. Fire Technology. 2020. 56(4). Pp. 1725–1754. DOI:10.1007/s10694-020-00950-w.

25. Khan, N., Ali, A.K., Tran, S.V.-T., Lee, D., Park, C. Visual language-aided construction fire safety planning approach in building information modeling. Applied Sciences (Switzerland). 2020. 10(5). Pp. 973–989. DOI:10.3390/app10051704.