

## Effect of Design on the Evacuation Time for the Colosseum of Rome

Gravit, Marina Viktorovna <sup>1</sup>   
 Kirik, Ekaterina Sergeevna <sup>2</sup>   
 Savchenko, Egor Timofeyevich <sup>1</sup> 

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

<sup>2</sup> Institute of Computational Modelling of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Krasnoyarsk, Russia

Correspondence:\* email: [savgor97@gmail.com](mailto:savgor97@gmail.com); contact phone [+79819732215](tel:+79819732215)

**Keywords:** arena; design; evacuation time; fire safety; organizing evacuation; computer simulation

### Abstract:

The article analyzes the space-planning characteristics of the most famous amphitheater of ancient times of the Roman Colosseum (Rome, Italy) in the field of evacuation in case of fire. 3D computer models of the arena were built, and evacuation was simulated using the Sigma FS software (Russia). A comparative analysis of the space-planning solutions of the arena with the modern concept of organizing the provision of the unhindered and timely evacuation of people is carried out. It has been established that a number of features have been designed in the Colosseum, which makes it possible to carry out evacuation more successfully than in modern sports facilities: the configuration of the stairs, providing a high speed of movement; the average duration of clusters is three times less, and there are fewer turns on the stairs. It is shown that the layout of the Colosseum makes it possible not to carry out a phased evacuation and does not require fencing the escape routes from the main space. In general, the Roman Colosseum did not require evacuation control (routing) to equalize a load of traffic on the stairs and reduce the time of congestion in front of the stairs.

**The object of research** A restoration of the Colosseum building and an evacuation from the Colosseum. **Method.** Computer simulation of pedestrian dynamics and analysis of results are applied. **Results.** The inner space of the Colosseum has been analyzed. A 3D model of an antique arena has been built, and the evacuation process has been simulated. The reasons for the evacuation delays have been identified. A comparative analysis with a modern stadium is carried out, some recommendations for organizing evacuation are offered.

## 1 Introduction

Спортивная арена с массовым пребыванием людей представляет объект повышенной опасности. Наибольшую опасность представляют режимы эксплуатации арен, предполагающие одновременное целевое перемещение людей. Такими являются освобождение стадиона (к этому процессу применяют термин «разгрузка» outflow) после мероприятия и экстренная эвакуация в случае возникновения чрезвычайной ситуации, например, пожара.

В случае разгрузки ключевую роль играет объемно-планировочное решение – протяженность, ширина, конфигурация и количество путей, которыми можно покинуть трибуны и здание, соотношенные со вместительностью.

В случае пожара часть путей может быть отрезана опасными факторами пожара (задымление, повышенная температура – далее ОФП), распространяющимся по путям эвакуации. В этом случае требуется перераспределение людей на другие пути, что предполагает в целом увеличение времени эвакуации. Согласно ч.3 ст.53 [1] в Российской Федерации, «безопасная эвакуация людей из зданий и сооружений при пожаре считается обеспеченной, если интервал времени от момента обнаружения пожара до завершения процесса эвакуации людей в

Gravit, M.V.; Kirik, E.S.; Savchenko, E.T.

Effect of Design on the Evacuation Time for the Colosseum of Rome;

2021; *Construction of Unique Buildings and Structures*; 95 Article No 9504. doi: 10.4123/CUBS.95.4

безопасную зону не превышает необходимого времени эвакуации людей при пожаре». Так же требуется обеспечение беспрепятственной эвакуации, которое выражается в том, что время скопления с плотностью, достигшей критического значения, не должно превышать 6 минут [2].

Крупные арены - это не только достояние современного мира. В античные времена такие арены тоже строились, из сохранившихся сейчас 7 коллизеев наиболее известная из них - Колизей в Риме (80 г.н.э.), оценки вместительности которого варьируются в пределах 40-50 тысяч человек, по некоторым оценкам – 80 тысяч [3]. Здание Колизея, будучи построенным из негорючих материалов (блоков травертинового камня, туфа, кирпича) и облицованное мрамором [4], содержало существенную пожарную нагрузку: на верхнем ярусе крепились вертикальные деревянные мачты, с которыми соединялись горизонтальные рейи и канатами натягивались тенты; деревянные клетки для животных, подъемные устройства, сено, солома в подвальных помещениях и подтрибунных галереях; ткани в ложах и на сидениях, носилки, корзины и т.д. Открытый огонь использовался для освещения.

Целью работы являлся анализ объемно-планировочных решений Колизея в Риме с точки зрения качественных и количественных показателей процесса эвакуации, который неизбежен при возникновении пожара, и соотнести их с действующими в Российской Федерации критериями.

В исследовании использовались современные возможности, такие как компьютерные модели и численное моделирование процессов. Известные результаты сосредоточены на восстановлении здания Колизея, например, в [5, 6] поставлена задача реконструировать здание в компьютерной модели с использованием программ для проектирования, основной акцент сделан на восстановлении внешнего облика здания без подробного описания планировки подтрибунного пространства. В [7] применялись численные методы для исследования устойчивости каменных кладок, использованных при строительстве Колизея. В [8] исследовалось влияние сейсмического воздействия на Колизей методом компьютерного моделирования. Таким образом, попытки воссоздать здание Колизея в компьютерной модели предпринимались для различных целей, но работы, где затрагиваются вопросы обеспечения пожарной безопасности, и, в частности, исследуется процесс эвакуации и/или распространения ОФП, не найдены.

В настоящее время компьютерное моделирование людских потоков [9, 10] применяется для анализа планировочных решений объектов с массовым пребыванием людей, временной инфраструктуры при проведении массовых мероприятий: музыкальные фестивали [11, 12]; спортивные арены и прилегающая инфраструктура [13 - 17], для анализа безопасности больших религиозных событий, как Хадж в Мекке (Саудовская Аравия) [18 - 21], оптимизации работы аэропортов, метро и вокзалов [22 - 25], организации поэтапной эвакуации [26].

В исследовании применен метод компьютерного моделирования эвакуации, использовалось программное обеспечение «Сигма ПБ» [27, 28, 29]. Для выполнения моделирования эвакуации (освобождение арены) при единовременном начале движения, приблизительно созданы пути эвакуации арены на основе имеющейся доступной информации [3]. При создании модели основной упор сделан именно на существенные особенности планировки, определяющие динамику эвакуации – подтрибунное пространство и лестницы, по которым основной поток спускается вниз.

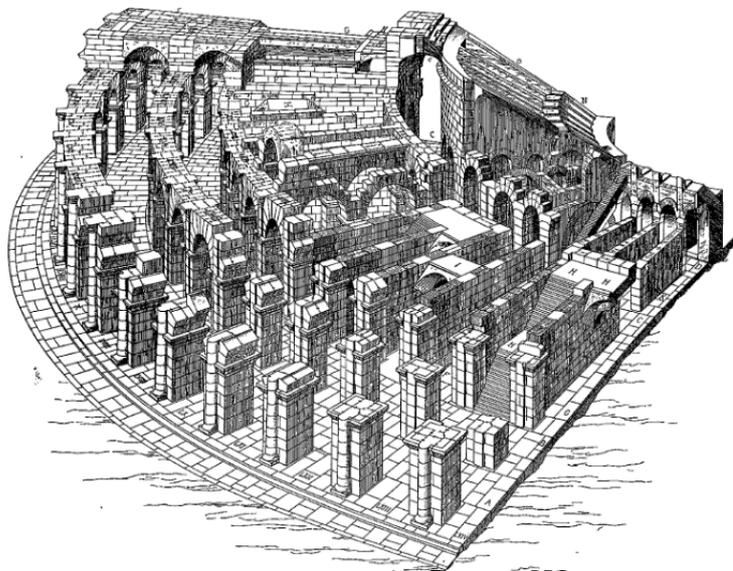
В следующем разделе приводится описание и анализ значимых для исследования особенностей объемно-планировочного решения Колизея в Риме. Далее описываются постановка задачи моделирования эвакуации из Колизея, приводятся результаты моделирования, даются комментарии и сравнительные оценки. Статья заканчивается обсуждением полученных результатов и выводами.

## 2 Materials and Methods

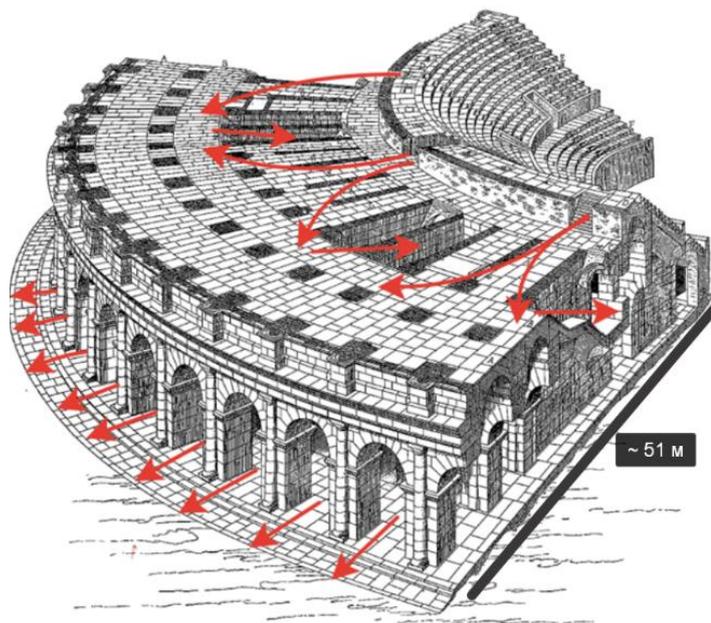
### 2.1 Описание объемно-планировочных решений Колизея

Поскольку единое мнение среди историков и архитекторов о конструктивных особенностях и внешнем виде античного амфитеатра отсутствует, сосредоточимся на тех особенностях, которые имеют существенное значение для цели исследования и создания модели для проведения моделирования эвакуации. В качестве базовых планировок используем вариант архитектурного отображения по Дурму (Durm) [3].

Центральную часть составляет овальная сцена, окруженная ровной полосой мест для зрителей, с отношением большой оси всего здания к малой, равным 1,22. Вокруг арены расположена овальная воронка с сидячими местами для зрителей, которая опирается на восемьдесят радиально направленных внутрь стен-перегородок, связанных между собой кольцевыми стенами и рядами арок и сводов, рисунок 1. Между ними расположено соответствующее количество радиально направленных переходов и лестничных клеток; между кольцевыми стенами и аркадами протянулись вдоль всего амфитеатра кольцевые галереи, создающие связь между проходами и лестницами. Наружные галереи второго и третьего этажа выступают в роли современных фойе. Высота галерей на этажах 10 -11 метров [5, 6].



**Рис. 1 – Схема первого этажа Колизея (Гюаде) [3]**  
**Fig. 1 - Scheme of the first floor of the Colosseum (Gyuade) [3]**



**Рис. 2 – Схема второго этажа Колизея (Гюаде) [3]**  
**Fig. 2 - Scheme of the second floor of the Colosseum (Gyuade) [3]**

По внешнему периметру имеется восемьдесят арок, которые дают восемьдесят входов в амфитеатр. Все входы/выходы располагаются на отметке земли (так называемый условный ноль), поэтому эвакуация происходит исключительно сверху вниз.

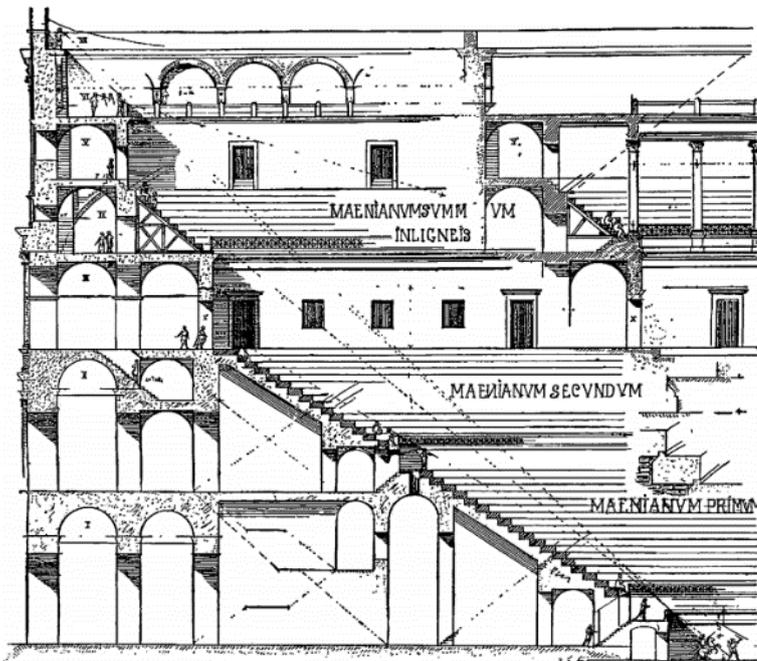


Рис. 3 – Схема архитектурно-планировочных решений Колизея по Дурму [3]  
 Fig. 3 - Scheme of architectural and planning solutions of the Colosseum (Durmu) [3]

Условно весь амфитеатр может быть поделён на 3 яруса, на каждом расположены подтрибунные галереи, трибуны и проходы к местам, рисунок 2,3. Свободная площадь каждого вышележащего этажа меньше предыдущего. Лестницы, связывающие этажи, расположены в объеме подтрибунного пространства.

При построении модели принято, что вход на трибуны нижнего яруса осуществлялся преимущественно через 2-й этаж, на трибуны 2-го яруса – через 3-й этаж, на трибуны 3-го яруса – через 4-й этаж, отметка которого примерно +40,00 [5, 6].

Первые два яруса состоят из 20 последовательных рядов трибун каждый, верхний содержит 16 рядов. Заполняемость принята в 48 тысяч зрителей.

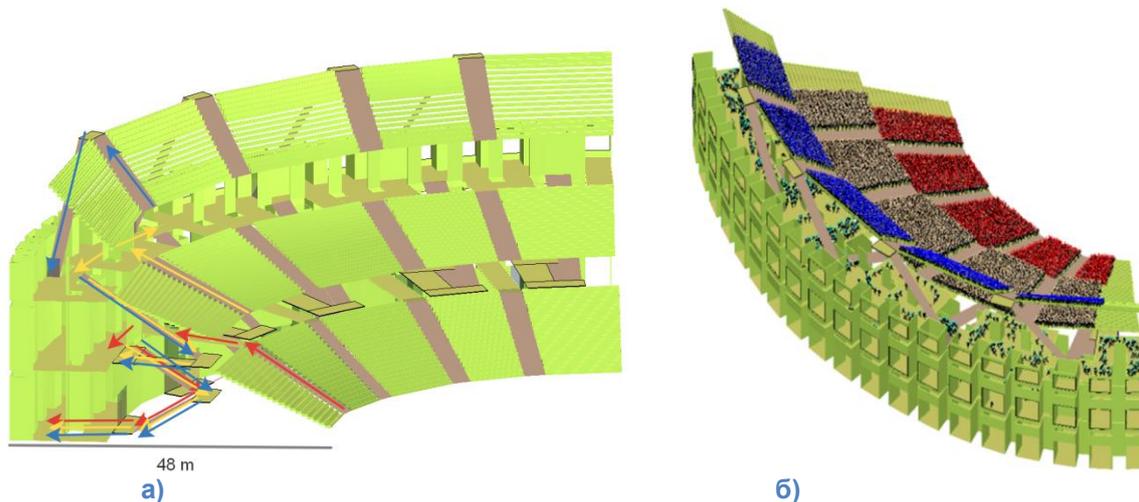
По обе стороны от каждого выхода в подтрибунную галерею в зоне прямой видимости находятся лестницы, обеспечивающие спуск вниз, рисунок 2. Лестницы расположены равномерно по всему периметру этажа. Количество лестниц определяется количеством выходов в подтрибунное пространство, и равно числу секторов на ярусе. Ширина пути по лестнице вдоль оси движения варьируется от 2 (для спуска с верхнего яруса трибун на 3-й этаж) до 4,5 метров в нижней части.

Подтрибунное пространство узко в сравнении с планировками современных арен, средняя ширина прохода вдоль оси движения по периметру яруса составляет 5 м. Роль подтрибунного пространства сводится к тому, чтобы обеспечивать возможность доступа на трибуны арены, и в этом же объеме сосредоточены лестницы, связывающие этажи. Вся конструкция является открытой, ограждение имеется только с внешней от чаши стороны. Подтрибунное пространство и трибуны практически не отгорожены друг от друга.

## 2.2 Исходные данные для выполнения моделирования эвакуации

Для анализа арены рассмотрим четверть Колизея, что оправдано симметричностью Колизея относительно обеих осей, рисунок 4а.

При построении компьютерной модели Колизея для последующего использования в качестве расчетной области наибольшее внимание уделено подтрибунному пространству и лестницам, обеспечивающим спуск с верхних ярусов, поскольку именно эта часть здания наибольшим образом влияет на время эвакуации. Конструкции лестниц для спуска с верхних ярусов примерно одинаковы по всему периметру арены и при создании компьютерной модели преследовалась цель обеспечить примерную длину и ширину каждого единичного пути с верхних этажей вниз, а также количество лестниц.



**Рис. 4 – 3D-модель Колизея, выполненная в ПО «Сигма ПБ»: а) вид со стороны арены, б) вид со стороны фасада здания и расположение людей на секторах**  
**Fig. 4 – Colosseum 3D model built in the Sigma PB software. Views from the side of (a) the arena and (b) the building facade and audience location in the sectors.**

Размеры внутреннего пространства взяты в масштабе относительно известных размеров, представленных на чертежах. В описаниях представлена ограниченная информация о конфигурации лестниц, использовавшихся для спуска с верхнего яруса на третий этаж. Известно, что зрители верхнего яруса сливались в потоки с соответствующих секторов нижних ярусов, поэтому лестницы, спускающие зрителей с верхнего яруса, восстановлены условно с целью обеспечения спуска на 3-й этаж значимого для дальнейшего рассмотрения в общем потоке количества зрителей. Каждый сектор трибун на каждом ярусе обеспечен лестницей, спускающей зрителей сектора на этаж ниже, где они пользуются ближайшей лестницей для дальнейшего движения вниз. В модель вошло 5 секторов, которые обеспечены 5-ю внутренними лестницами. Для исключения влияния граничных эффектов анализировалась динамика движения людей на центральной части – 3 центральных сектора и 3 центральных лестницы. С этой же целью крайние сектора в модели заполнены лишь наполовину, рисунок 4б.

Для анализа объемно-планировочных решений арены рассчитаны количественные показатели. Анализу подверглась динамика спуска с третьего этажа на первый (перепад высот составляет 22 метра, длина пути по лестнице примерно 63 м).

Количественные характеристики получены с применением компьютерного моделирования движения людей (эвакуации). Моделирование выполнено в программном комплексе «Сигма ПБ» [27 - 29]. Программа применялась для решения задач проверки объемно-планировочных решений и организации пешеходных зон для объектов Чемпионата мира по футболу 2018 и Универсиады 2019 [16, 17, 30].

Для моделирования эвакуации в программе реализована индивидуально-поточная модель. Модель предполагает расчет положения каждого человека с учетом положения других людей и препятствий на плоскости в каждый момент времени, позволяет задавать индивидуальные характеристики: скорость свободного движения, площадь проекции, путь, время начала движения. Для моделирования пешеходного движения на объектах с трибунами индивидуально-поточная модель подходит наилучшим образом.

При выполнении расчетов приняты следующие индивидуальные характеристики людей:

- средняя максимальная скорость свободного движения человека: 1,66 м/с [2, 31];
- фундаментальная диаграмма, отвечающая за связь скорости и текущей плотности потока из [2, 31] (нельзя утверждать, что это в полной мере оправдано в отношении Колизея, но данное предположение уравнивает анализируемые результаты с точки зрения предельных скоростных характеристик потока и его динамики);
- площадь горизонтальной проекции человека: 0,1 м<sup>2</sup> [2, 31].

Отличия по гендерному признаку, возрасту, состоянию здоровья и иным показателям в данном исследовании не учитывались.

В качестве расчетной области рассматривались трибуны, подтрибунные галереи, лестницы. В начальный момент времени люди находились на трибунах или подтрибунном пространстве. Моделировался процесс эвакуации людей из здания Колизея до выхода наружу на уровне первого этажа.

### 3 Results and Discussion

#### 3.1 Результаты моделирования

На рисунке 5 представлено положение людей при эвакуации из Колизея на 70 и 200 секундах от начала.

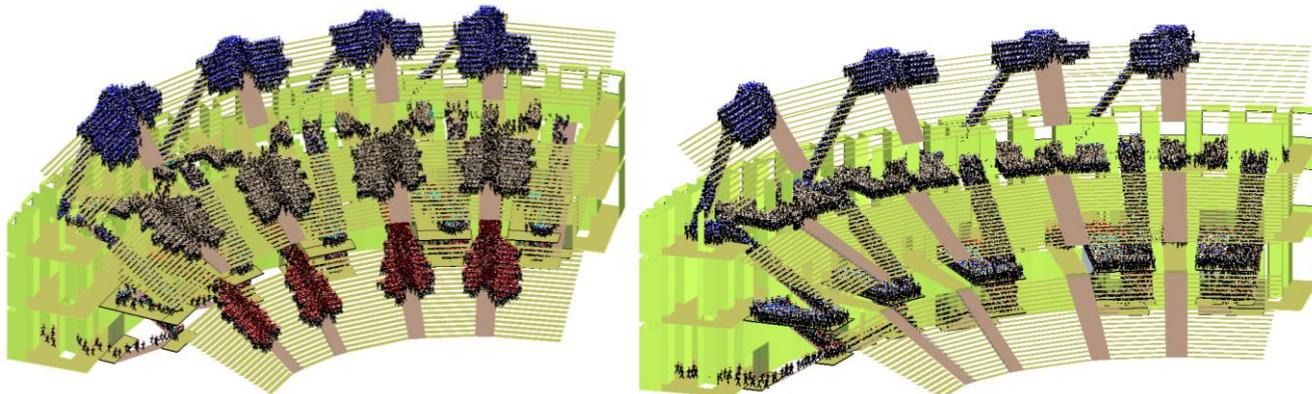


Рис. 5 – Положение людей при эвакуации из Колизея на 70 с и 200 с от ее начала  
Fig. 5 – People's positions in the Colosseum at the 70 s and 200 s from beginning of the evacuation

Данные по количеству человек, прошедших по лестнице, потраченное время  $t$  и величина потока  $Q$ , как отношение  $Q = N/t$ , чел./с, представлены в таблице 1.

Таблица 1. Числовые характеристики Колизея (количество человек ( $N$ ), прошедших по лестнице, за время  $t$  (с), поток  $Q = N/t$  чел./с)  
Table 1. Numerical characteristics of the Colosseum (number  $N$  of the persons who passed the stairs in time  $t$  [s], and the flow rate  $Q = N/t$  [person/s])

Номер сектора (лестницы)	Ширина - 2,8 м, макс. перепад высот - 22 м		
	$N$	$t$ , с	$Q$ , чел./с
1	2150	705	3,1
2	2405	760	3,2
3	2480	740	3,4
4	2720	840	3,2
5	Среднее		3,2

Давая оценки полученным количественным результатам, следует упомянуть о том, что внутреннее пространство и, в частности, лестницы восстановлены приближенно. Однако объем подтрибунного пространства на этажах Колизея (доступный для исследования в настоящее время) [1] и информация об устройстве подтрибунного пространства, длины осей в плане позволяют оценить принятую в модели геометрию вертикальных связей Колизея как достаточную для настоящего исследования. Так, спуск между этажами 3 и 2 восстановлен прямым (без поворотов, его длина 21,5 м, рисунок 4а), он занимает пространство под трибунами 2-го яруса. Марши, уходящие вниз с этажа сонаправлены, для перехода на следующий марш нужно совершить два поворота на 180 градусов. Между этажами 2 и 1 имеется один поворот на 180 градусов, всего при спуске между этажами 3 и 1 имеется три поворота на 180 градусов, средний уклон маршей в модели составляет 30 градусов.

При средней ширине маршей 2,8 м средний удельный поток составляет  $q_{\text{среднее}} = 1,14$  чел/с/м. Равномерность расположения лестниц обеспечивает примерно равномерную их нагрузку. На рисунке 6 представлены поле суммарной интенсивности и поле интенсивности скоплений. Поля измеряются в секундах, максимальное значение суммарной интенсивности 730 с (соответствует красному цвету), интенсивности скоплений – 500 секунд (соответствует красному цвету). Как видно, наибольшая интенсивность фиксируется на 3-м этаже, поскольку сюда стекаются зрители с двух ярусов (2-го и 3-го). На этом же этаже наиболее продолжительные скопления, в среднем длительность составляет 200-250 секунд, при этом плотность близка к критической согласно [2] (но не достигается критическое значение по продолжительности скопления согласно [2]).

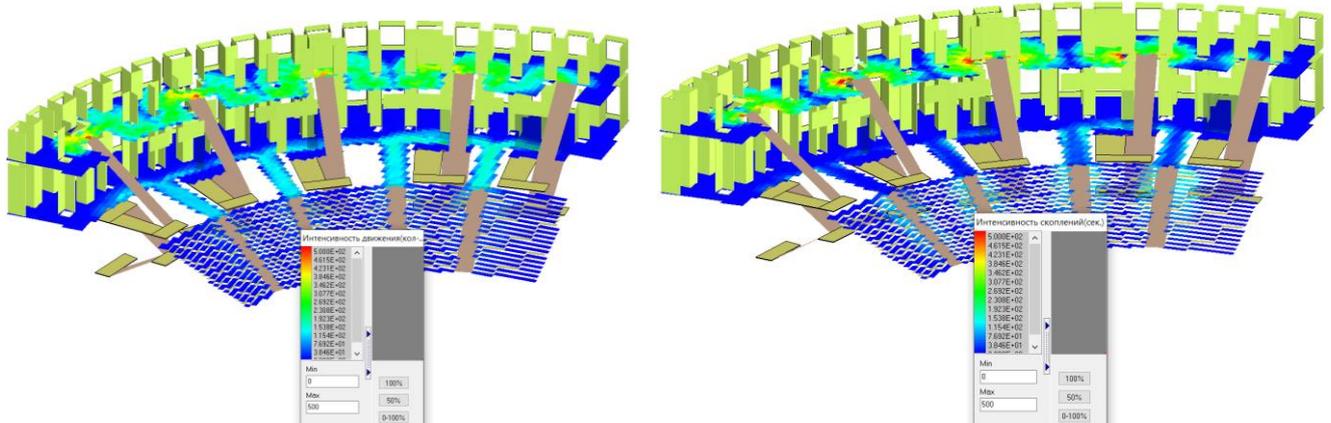


Рис. 6 – Поле суммарной интенсивности движения, с, и поле интенсивности скоплений, с, на 2-м и 3-м этажах Колизея

Fig. 6 – The field of sum intensity and mass gathering intensity field in the 2d and the 3rd floor of the Colosseum

### 3.2 Обсуждение

Колизей является открытым сооружением, в случае пожара препятствий для распространения ОФП, и в первую очередь, задымлению, практически нет. Такая особенность сооружения с одной стороны обеспечивает выветривание ОФП, но не исключает и воздействие на людей, поэтому определяющим параметром для эвакуации в этом случае является скорость покидания здания. Высокая скорость перемещения людей с ярусов реализована за счет максимально спрямленных путей эвакуации.

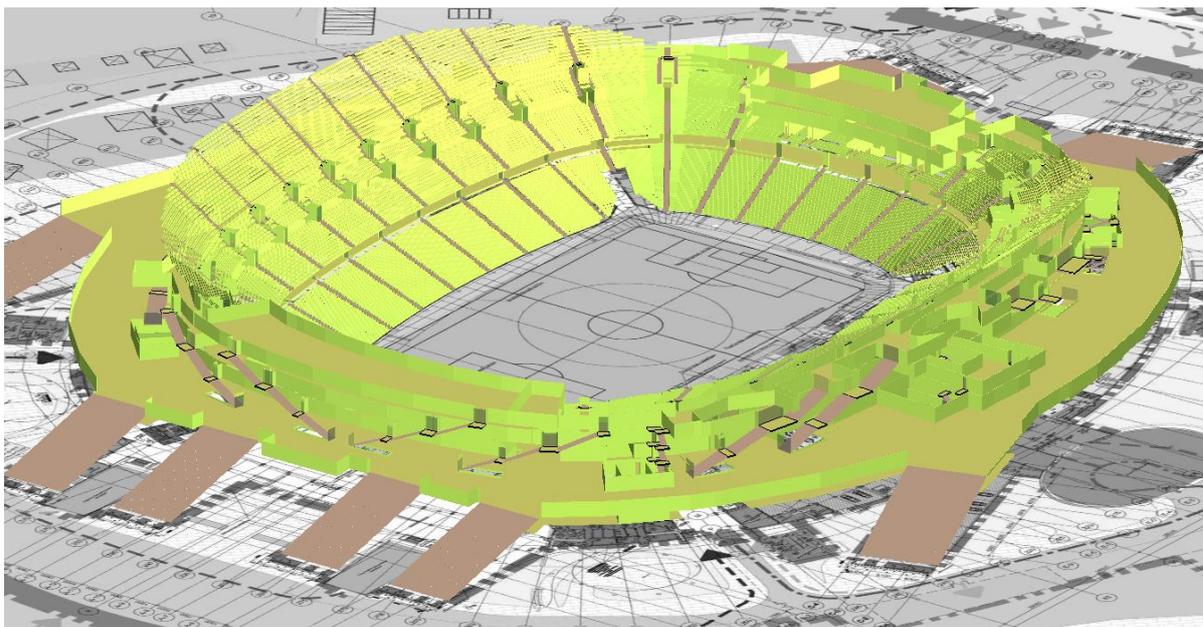
В Колизее местами скопления с повышенной плотностью (6 и более чел/м<sup>2</sup>) являются выходы на лестницы вниз на 3-м этаже, поскольку пропускная способность этих лестниц ниже, чем интенсивность потоков со 2-го и 3-го ярусов. Тем не менее, продолжительность скоплений с высокой плотностью не превышает 6 минут (пороговое значение согласно [2]).

Таблица 2. Сводная таблица характеристик Колизея  
Table 2. Summary table of the Colosseum characteristics

Н.п.	Характеристика	Колизей
1.	Минимальная величина потока по лестнице, чел./м/с	1,14
2.	Количество поворотов на 180° на лестнице, шт.	3
3.	Средняя длительность скоплений, с	360
4.	Управление эвакуацией (маршрутизация) для выравнивания нагрузки на лестницы, уменьшения времени скопления перед лестницами	не требуется
5.	Поэтапная эвакуация	не требуется
6.	Ограждение путей эвакуации от основного пространства	нет

7.	Защита от воздействия ОФП	конфигурация лестниц, обеспечивающая высокую скорость перемещения
8.	Свободный переход к соседнему люку по трибуне	да
9.	Обеспеченность каждой трибуны своей лестницей (лестниц/трибун)	1/1

Проводя аналогии с современными аренами отметим следующее. Подтрибунное пространство Колизея выполняло лишь коммуникационную роль, что отражено в размерах и планировке соответствующих областей здания; лестницы находятся в объеме подтрибунного пространства и не являются отгороженными от общего объема. Объемно-планировочное решение подтрибунного пространства современных арен со сравнимой вместительностью таково, что оно отгорожено от чаши, является закрытым, как правило, имеет тепловой контур, разделено на секции, предполагает размещение различных сервисов (фудкорты, анимация и пр.), при этом количество этажей, на которых размещаются подтрибунные пространства может достигать 6-7, высота же современных арен сравнима с Колизеем. Лестницы должны обеспечивать связь между этажами, что влечет соответствующую конструкцию лестниц: с большим количеством маршей и поворотов, так например в «Газпром-Арене» количество поворотов на 180° на одной лестнице может достигать 8 ед., в «Открытие Арена» – 5, что в свою очередь влечет значимое снижение пропускной способности лестницы в целом [32], так для обоих случаев  $q_{\text{среднее}} = 0,75$  чел/с/м. В таких условиях существенным является выделение вертикальных коммуникационных путей в отдельное пространство (лестничные клетки), где различными способами обеспечивается защита людей от воздействия ОФП во время пожара.



**Рис. 7 – Модель стадиона Фишт, спрямленная конструкция лестниц, ведущих с верхней чаши**  
**Fig. 7 – The model of the Fisht arena in Sochi**

Для арен, где климатические условия позволяют не выделять тепловой контур в подтрибунном пространстве, можно отметить схожую с Колизеем открытую организацию подтрибунного пространства. Такое решение дает определенную свободу в планировании вертикальных связей при реализации современных тенденций организовывать сервисы на площадях подтрибунного пространства. В качестве примера приведем стадион Фишт, г.Сочи, который принимал в 2017 и 2018 году игры FIFA. Здесь лестницы, ведущие с ярусов верхней чаши, вынесены из объема подтрибунного пространства и опоясывают тело здания снаружи, (рисунок 7), при этом не имеют на своем протяжении ни одного поворота, кроме непосредственного стыка с этажом. Среднее значение удельного потока, обеспечиваемого каждой такой лестницей

Gravit, M.V.; Kirik, E.S.; Savchenko, E.T.

Effect of Design on the Evacuation Time for the Colosseum of Rome;

2021; *Construction of Unique Buildings and Structures*; 95 Article No 9504. doi: 10.4123/CUBS.95.4

составляет  $q_{\text{среднее}} = 1,65$  чел/с/м, что превышает значение, полученное для Колизея, по причине отсутствия поворотов у лестниц.

## 4 Conclusions

Несмотря на давность принятых объемно-планировочных решений римского Колизея, конфигурация лестниц и пространств в некоторых аспектах является более выигрышной в сравнении с современными спортивно-зрелищными аренами. Подтрибунное пространство Колизея выполняло лишь коммуникационную роль, что отражено в размерах и планировке соответствующих областей здания; лестницы находятся в объеме подтрибунного пространства, за счет этого обеспечивалась максимальная скорость покидания людьми сооружения. В современных аренах, подтрибунное пространство преимущественно является отгороженным от внешней среды и открытой чаши, что необходимо для реализации различных сервисов для зрителей. Вертикальные коммуникационные пути вынесены на внешний периметр подтрибунного пространства, выгорожены стенами, являются незадымляемыми, и тем самым обеспечивается противодымная защита людей. Такие решения отражаются на стоимости строительства и эксплуатации. Нередко требуется организация поэтапной эвакуации, что влечет постоянное обучение персонала по организации выгрузки и эвакуации. В Колизее же за счет реализации именно объемно-планировочного решения подтрибунного пространства, отмечается большая устойчивость и слабая потребность процесса эвакуации в управленческих воздействиях: не требуется поэтапная эвакуация, и управление эвакуацией (маршрутизация) для выравнивания нагрузки на лестницы и уменьшения времени скопления перед лестницами.

Наметившаяся тенденция адаптации и использования древних колизеев для проведения музыкальных и театральных массовых мероприятий придает значимости данному исследованию.

## References

1. Technical regulations on fire safety requirements. Federal law No. 123-FZ of July 22, 2008 (in Russ)
2. Fire risk code for buildings / EMERCOM of Russia. 2009. Available at: <https://base.garant.ru/12169057/>
3. Tires A. G. Architecture of the Colosseum. Moscow: Publishing house Of the Academy of architecture of the USSR, 1940. (in Russ.)
4. Devoti, L. Circhi e stadi di Roma antica; Tascabili Economici Newton, 1997; p. 62. In Italian.
5. Tan, A.; Croft, F.M., J.; Tan, F. Computer graphic modeling for the reconstruction of the Roman Colosseum.
6. Hernández, A.J. Roman Amphitheatres in Baetica: Considerations on Geometry, Design and Drawing. 314 *Archivo Español de Arqueología* 2015, 88, 127–148. doi:10.3989/aespa.088.015.007.
7. Napolitano, R.; Glisic, B. Understanding the function of bonding courses in masonry construction: 316 An investigation with mixed numerical methods. *Journal of Cultural Heritage* 2019, 39, 120–129. 317 doi:10.1016/j.culher.2019.03.007
8. Croci, G. The Colosseum: safety evaluation and preliminary criteria of intervention. *Structural Analysis of 319 Historical Constructions*; Roca, P.; González, J.L.; Marí, A.R.; Onate, E., Eds., 1996, pp. 154–165.
9. Kuligowski, E.D. Computer Evacuation Models for Buildings. *SFPE Handbook of Fire Protection Engineering*. Springer New York. New York, NY, 2016. Pp. 2152–2180. DOI: 10.1007/978-1-4939-2565-0\_60. URL: [https://link.springer.com/chapter/10.1007%2F978-1-4939-2565-0\\_60](https://link.springer.com/chapter/10.1007%2F978-1-4939-2565-0_60)
10. Schadschneider, A., Klingsch, W., Klüpfel, H., Kretz, T., Rogsch, C., Seyfried, A. Evacuation Dynamics: Empirical Results, Modeling and Applications. *Encyclopedia of Complexity and Systems Science*. Springer New York. New York, NY, 2009. Pp. 3142–3176. DOI:

- 10.1007/978-0-387-30440-3\_187. URL:  
[https://link.springer.com/referenceworkentry/10.1007%2F978-0-387-30440-3\\_187](https://link.springer.com/referenceworkentry/10.1007%2F978-0-387-30440-3_187)
11. Ronchi, E., Uriz, F.N., Criel, X., Reilly, P. Modelling large-scale evacuation of music festivals. *Case Studies in Fire Safety*. 2016. 5. Pp. 11–19. DOI:<https://doi.org/10.1016/j.csfs.2015.12.002>. URL:  
<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2214398X15300066>
  12. Pretorius, M., Gwynne, S., Galea, E.R. Large crowd modelling: an analysis of the Duisburg Love Parade disaster. *Fire and Materials*. 2015. 39(4). Pp. 301–322. DOI:10.1002/fam.2214. URL: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1002/fam.2214>
  13. Wagoum, A.U.K., Seyfried, A. Conception, Development, Installation and Evaluation of a Real Time Evacuation Assistant for Complex Buildings. *Procedia - Social and Behavioral Sciences*. 2013. 104. Pp. 728–736. DOI: 10.1016/j.sbspro.2013.11.167.
  14. Boltes, M., Seyfried, A. Collecting pedestrian trajectories. *Neurocomputing*. 2013. 100. Pp. 127–133. DOI: 10.1016/j.neucom.2012.01.036. URL:  
<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0925231212003189>.
  15. Wei, Z., Hui, D. & Tong, W. The application of fire spread and evacuation simulation technology in large stadium. *Stoch Environ Res Risk Assess* 23, 433 (2009). <https://doi.org/10.1007/s00477-008-0239-1>
  16. Kirik E., Malyshev A., Vitova T., Popel E., Kharlamov E. Pedestrian movement simulation for stadiums design // *Materials Science and Engineering // IOP Conf. Ser.: Materials Science and Engineering*, 456 (2018), 012074 doi:10.1088/1757-899X/456/1/012074 (<https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1757-899X/456/1/012074/meta>)
  17. Kirik, E., Malyshev, A. Computer Simulation of Pedestrian Flows for Universiade 2019 Sport Facilities Versus Hand Calculations // In: *Proceedings of Pedestrian and Evacuation Dynamics 2016, Collective Dynamics*, 1, A11, 2016. P.446-454.
  18. Dridi, M.H. Simulation of High Density Pedestrian Flow: A Microscopic Model. *Open Journal of Modelling and Simulation*. 2015. 3. Pp. 81-95. DOI: 10.4236/ojmsi.2015.33009. URL: <https://www.scirp.org/journal/paperinformation.aspx?paperid=57296>
  19. Khan, S.D. Congestion detection in pedestrian crowds using oscillation in motion trajectories. *Engineering Applications of Artificial Intelligence*. 2019. 85. Pp. 429–443. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.engappai.2019.07.009>. URL:  
<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0952197619301733>.
  20. Khan, S.D., Vizzari, G., Bandini, S. A computer vision tool set for innovative elder pedestrians aware crowd management support systems. *CEUR Workshop Proceedings*. 2017. 1803. Pp. 75–91. URL: <http://ceur-ws.org/Vol-1803/paper6.pdf>
  21. Shimura, K., Khan, S.D., Bandini, S., Nishinari, K. Simulation and evaluation of spiral movement of pedestrians: Towards the tawaf simulator. *Journal of Cellular Automata*. 2016. 11(4). Pp. 275–284. URL: <https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-84964308216&partnerID=40&md5=ac2c9ce87bd6c910136c6e228f262753>
  22. Mitsopoulou, M., Dourvas, N., Georgoudas, I.G., Sirakoulis, G.C. *Cellular Automata Model for Crowd Behavior Management in Airports*. Parallel Processing and Applied Mathematics. Springer International Publishing. Cham, 2020. Pp. 445–456. DOI: 10.1007/978-3-030-43222-5\_39. URL: [https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-030-43222-5\\_39](https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-030-43222-5_39)
  23. Davidich, M., Geiss, F., Mayer, H.G., Pfaffinger, A., Royer, C. Waiting zones for realistic modelling of pedestrian dynamics: A case study using two major German railway stations as examples. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*. 2013. 37. Pp. 210–222. DOI: 10.1016/j.trc.2013.02.016. URL:  
<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0968090X13000557?via%3Dihub>
  24. Wang, W.L., Lo, S.M., Liu, S.B., Ma, J. On the Use of a Pedestrian Simulation Model with Natural Behavior Representation in Metro Stations. *Procedia Computer Science*. 2015. 52. Pp. 137–144. DOI: 10.1016/j.procs.2015.05.048. URL:  
<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1877050915008480?via%3Dihub>

Gravit, M.V.; Kirik, E.S.; Savchenko, E.T.

Effect of Design on the Evacuation Time for the Colosseum of Rome;

2021; *Construction of Unique Buildings and Structures*; 95 Article No 9504. doi: 10.4123/CUBS.95.4

25. Trivedi, A., Pandey, M. Agent Based Modelling and Simulation to estimate movement time of pilgrims from one place to another at Allahabad Jn. Railway Station during Kumbh Mela-2019. *Autonomous Agents and Multi-Agent Systems*. 2020. 34, 30. DOI:10.1007/s10458-020-09454-x. URL: <https://link.springer.com/article/10.1007%2Fs10458-020-09454-x>
26. Gravit, M.; Dmitriev, I.; Kuzenkov, K. Phased evacuation algorithm for high-rise buildings. *MATEC Web of 363 Conferences 2018*, 245, 11012. doi:10.1051/mateconf/201824511012.
27. Kirik, E., Vitova, T., Malyshev, A., Popel, E.: A Conjunction of the Discrete-Continuous Pedestrian Dynamics Model SigmaEva with Fundamental Diagrams. In: Wyrzykowski R., Deelman E., Dongarra J., Karczewski K. (eds) *Parallel Processing and Applied Mathematics. PPAM 2019. LNCS*, vol. 12044, pp. 457--466. Springer, Cham (2020) [https://doi.org/10.1007/978-3-030-43222-5\\_40](https://doi.org/10.1007/978-3-030-43222-5_40)
28. Kirik E., Litvintsev K., Dekterev A., Khasanov I., Gavrilov A., Malyshev A., Harlamov E., Popel E. Simulations of fire evacuations in "Sigma FS" software as a fire safety training instrument // *Proceedings of the Ninth International Seminar on Fire and Explosion Hazards (21-26 April 2019 Saint Petersburg, Russia)*, edited by A. Snegirev, Vol. 2. P. — 1281-1292. <http://doi.org/10.18720/SPBPU/2/k19-120>
29. Kirik E. S., Vitova T. B. Pedestrian movement: analysis of real experiments in a straight corridor and validation of "Sigma SF" Software. *Fire Safety*. 2020. № 1 (98). N 1, 2020. P.51-62. (in Russ)
30. Kirik, E. S.; Vitova, T. B.; Malyshev, A. V.; Popel, E. V.; Kharlamov, E. B.; Moiseichenko, V. A.; Kalinin, E. S.; Smirnov, N. V. Computer Simulation of Pedestrian Dynamics in the Design and Operation of Stadiums; 2021; *Construction of Unique Buildings and Structures*; Volume 94 Article No 9401. doi: 10.4123/CUBS.94.1
31. Kholshchevnikov V. Forecast of human behavior during fire evacuation, *Proceedings of the International conference "Emergency evacuation of people from buildings – EMEVA"*. Warsaw: Belstudio, (2011) 139-153.
32. Huo F., Song W., Chen L., Liu C., Liew K.M. Experimental study on characteristics of pedestrian evacuation on stairs in a high-rise building, *Safety Science*, Vol. 86, 2016, pp. 165-173, <https://doi.org/10.1016/j.ssci.2016.02.025>