










Computer Simulation of Pedestrian Dynamics in the Design and Operation of Stadiums

Kirik, Ekaterina Sergeevna^{1*} 
 Vitova, Tatiana Bronislavovna¹ 
 Malyshev, Andrei Valerievich¹ 
 Popel, Egor Viktorovich¹ 
 Kharlamov, Egor Borisovich² 
 Moiseichenko, Viacheslav Aleksandrovich¹ 
 Kalinin, Egor Sergeevich¹ 
 Smirnov, Nikolai Vasilevich³ 

¹ ICM SB RAS, Krasnoyarsk, Russian Federation

² IT SB RAS, Novosibirsk, Russian Federation

³ FGBU VNIPO of EMERCOM of Russia, Balashikha, Russian Federation

Correspondence:* email kirik@icm.krasn.ru; contact phone [+79029921689](tel:+79029921689)

Keywords:

Stadiums; Pedestrian Safety; Computer Simulation; Autonomous agents; Simulation platform

Abstract:

The object of research is the safety and comfort of spectators while moving in stadiums and the adjacent territory. This work aims to show how using computer simulation helps analyze the influence of different conditions and check the stadium's environment from people's comfort and safety points of view. **Method.** Computer simulation of pedestrian dynamics and analysis of results are applied. **Results.** Several arenas were considered. The influence of client groups, the layout of the stadium, and the adjacent territory, including landscape features, temporary infrastructure, were studied. Areas of high density (or congestions) were found where a potential threat to people in the case of maximum loading of the stadiums is concentrated. Ways to avoid threats were suggested and checked using computer simulation of people's movement.

1 Introduction

Стадионы и другие объекты массового пребывания людей являются источником угрозы потому, что здесь множество людей сосредоточено в ограниченном пространстве. Трагические ситуации на стадионах случаются регулярно, например: 28 мая 2017, Гондурас – 5 погибших [1]; 10 февраля 2017, Ангола, г. Уижа – 17 [2]; 1 февраля 2012, Египет, Порт-Саид – 74 [3]; 23 октября 2010, Кения, Найроби – 7 [4]; 16 октября 1996, Гватемала, стадион Mateo Flores – 82 [5]; 15 апреля 1989, Англия, Шеффилд – 96 [6]; 20 октября 1982, Москва – 66 [7]; 3 декабря 1979, США, Цинциннати – 11 [8]; 24 мая 1964, Перу, Лима – 328 [9]. Причины трагедий различны: давка на входе (количество проданных билетов превышает вместимость стадиона) или на выходе из-за неправильной организации процесса (закрытые ворота, администрация стадиона несвоевременно среагировала на текущую ситуацию и не приняла должных мер), обрушение конструкций стадиона, беспорядки на трибунах, действия полиции, природные катаклизмы.

Стадион – это сложное сооружение. Допускаются различные режимы эксплуатации: спортивные события, концерты, ярмарки, что приводит к использованию временной инфраструктуры. Наличие клиентских групп (VIP, VVIP, фан-зоны) также может очень сильно изменить текущий режим эксплуатации, например, закрытие общего доступа в определенные части стадиона (подтрибунного пространства), исключение сквозных проходов в чаше и на этажах. Отличительной чертой стадионов (например, от зданий офисного типа) является то, что

здесь имеются большие открытые пространства, особые территории (трибуны, стенды, турникеты), возможно более близкое взаимодействие большого количества человек (сотни, тысячи и десятки тысяч). Так, по требованиям ФИФА стадионы на чемпионат мира по футболу должны вмещать до 80 тысяч человек.

Организация масштабных мероприятий требует усиленных мер и новых концепций безопасности, адаптированных к большому количеству людей. На проектировщиках стадионов, а затем на администрации и на организаторах мероприятий, лежит большая ответственность: спортивная арена и прилегающая территория должны быть устроены так, чтобы обеспечивать комфортное пребывание зрителей, не допускать возможности образования плотных скоплений людей, а в чрезвычайной ситуации обеспечивать безопасную эвакуацию с объекта.

Решить эти задачи можно с помощью имитационного моделирования движения людей [10]–[16]. Развитие компьютерной техники и технологий очень сильно повлияли на развитие таких моделей и на расширение их возможностей. Имитационные модели могут наглядно демонстрировать движение людей на стадионе и на прилегающей территории, позволяют оценить пропускную способность коридоров, проходов и лестничных маршей, определить предельно допустимое количество людей для каждой зоны, время эвакуации, конфигурацию путей, промоделировать загрузку и выгрузку объекта для различных вариантов организации процесса. Моделировать сценарии, ориентированные на происходящее на стадионе событие. Можно использовать для обучения персонала и администрации. Можно применять как на стадии проектирования объекта, так и уже к существующим объектам.

Моделирование движения людей применяется для анализа инфраструктуры при проведении массовых мероприятий, для анализа функционирования мест массового пребывания людей. В работе [17] исследуется три сценария эвакуации с музыкального фестиваля вместимостью 65 тысяч человек. Также моделируются уже прошедшие трагические события. В [18] по видеозаписям анализируются события на музыкальном фестивале «Love parade» (Германия, 2010 г.), на котором в давке погиб 21 человек. Разработаны сценарии: близкий к произошедшему и альтернативные, которые затем реализовывались с помощью модели движения людей. В области моделирования находилось 26 тысяч человек. В [19] представлена разработанная система моделирования движения людей в режиме реального времени с горизонтом моделирования на ближайшие 15 минут на многофункциональной арене в Дюссельдорфе (Германия). Стартовым состоянием принимаются текущие позиции людей и текущая стадия мероприятия, используется предварительный анализ траекторий движения людей на стадионе [20]. Модели движения людей применяются для анализа безопасности больших религиозных событий: Хадж в Мекке (Саудовская Аравия) [21]–[24]; для оптимизации работы аэропортов, метро и вокзалов [25]–[28]; для разработки планов поэтапной эвакуации [29]. Больше примеров использования компьютерного моделирования для имитации движения людей можно найти на сайтах коммерческих компаний: Crowd dynamics [30], INCONTROL [31], STEPS [32], Legion [33], Oasys [34], Pathfinder [35], PedGo [36], Simulex [37], Anylogic [38], 3ksigma [39] и др.

В данной работе на конкретных примерах показано, как применение компьютерного моделирования пешеходного движения позволяет выявлять проблемные зоны зданий стадионов и прилегающей территории с точки зрения обеспечения безопасного и комфортного движения, разрабатывать компенсационные мероприятия. Рассматривается несколько спортивно-зрелищных арен: проектируемые и существующие футбольные стадионы, ледовая арена. Исследуются влияние клиентских групп, планировки стадиона и прилегающей территории, включая особенности ландшафта, временной инфраструктуры на движение людей в разрезе обеспечения безопасных и комфортных условий. Для моделирования движения людей применяется программный комплекс «Сигма ПБ».

В следующем разделе приводится описание применяемого подхода в целом и особенности используемой математической модели движения людей. Далее рассмотрены несколько примеров, в которых показано, как на основе анализа результатов моделирования пешеходного движения выявлены «узкие» места объектов, в чем заключается выявленная проблема, как ее можно устранить. Статья завершается обобщением представленных результатов и выводами о целесообразности применения имитационного моделирования пешеходного движения.

2 Methods

В работе применяется системный подход: выполняется компьютерное моделирование, результатам моделирования процессов дается экспертная оценка, находятся проблемные зоны исследуемого объекта, разрабатываются решения, проводится тестирование.

Работа происходит по следующему алгоритму:

- 1) разработка сценариев;
- 2) построение компьютерной 3D-модели (стадион, прилегающая территория, временная инфраструктура);
- 3) ввод исходных данных согласно разработанным сценариям;
- 4) выполнение моделирования;
- 5) анализ расчета (в том числе с использованием «тепловых карт»), определение «узких мест»;
- 6) разработка компенсирующих мер и проверка их эффективности дополнительным расчетом.

Для моделирования движения людей на стадионах применяется имитационная модель индивидуально-поточно типа [16], [40]–[43]. Модель реализована в программном комплексе «Сигма ПБ». Приведем некоторые основные положения модели.

Движение людей рассматривается на плоскости, и траектория каждого человека моделируется индивидуально, с учетом влияния других людей и окружающего пространства. Человек представляется в виде круга, площадь которого может варьироваться от 0.05 до 0.9 квадратного метра. В процессе моделирования заданная площадь проекции не изменяется, человек рассматривается как несжимаемая частица. Люди могут двигаться только в свободном пространстве, пересечений кругов не допускается. Набор направлений, в которых они могут двигаться, ограничен. Направление движения вычисляется для каждого человека на каждом расчетном шаге с учетом плотности расположения других людей и расположения стен, мебели и выходов в рассматриваемом направлении. Управляя параметрами модели (степень желания идти по направлению к выходу, степень влияния плотности расположения людей, близости стен и препятствий), можно воспроизводить движение от строго направленного (когда человек движется самым кратчайшим путем к цели, например, выходу из здания при эвакуации), до случайного, иррационального, свойственного состоянию паники.

В начальный момент времени каждому человеку i задается скорость свободного движения v_i^0 (скорость в свободном пространстве, когда другие участники не влияют на движение). В зависимости от групп мобильности [44], [45] v_i^0 может принимать значения от 0.5 до 2 м/с. Текущая скорость $v_i(t)$ на расчетном шаге t не может быть выше v_i^0 , так как известно, что с увеличением плотности расположения людей скорость человека уменьшается, и эта зависимость имеет аналитическое выражение [44]–[47]. Скорость движения $v_i(t)$ в выбранном направлении $\hat{\alpha}$ с учетом локальной плотности $F_i(r_{\hat{\alpha}}^*)$ определяется согласно [44], [45]:

$$v_i(t) = \begin{cases} v_i^0 \left(1 - a_l \ln \frac{F_i(r_{\hat{\alpha}}^*)}{F_{кр}}\right), & F_i(r_{\hat{\alpha}}^*) > F_{кр}; \\ v_i^0, & F_i(r_{\hat{\alpha}}^*) \leq F_{кр}, \end{cases}$$

где $F_{кр}$ – пороговое значение плотности потока, коэффициент $a_l = 0.295$ для горизонтального пути и проёмов [44], [45], $r_{\hat{\alpha}}^*$ – расстояние, на котором вычисляется локальная плотность (параметр модели).

В результате моделируется движение, как каждого отдельного человека, так и явлений, свойственных потоку людей: слияние, переформирование (растекание, уплотнение), неодновременность слияния потоков, образование и рассасывание скоплений, обтекание поворотов, движение в помещениях с развитой внутренней планировкой, противотоки и пересекающиеся потоки.

На основе результатов моделирования определяются временные характеристики, характерные особенности динамики процессов, скорости, продолжительность скоплений, строятся «тепловые карты». Анализ этой информации позволяет делать выводы о наличии/отсутствии «узких» мест объезда при учтенных в сценарии условиях.

3 Results and Discussion

Применение компьютерного моделирования позволяет изучать развитие ситуаций, протекающих в соответствии с различными сценариями. На основе анализа результатов расчетов можно прогнозировать, где может создаться опасная ситуация, каковы предпосылки ее развития, давать оценку (качественную и количественную) последствиям.

Для объектов массового пребывания выделяют несколько уровней комфорта от А до F [48], которые характеризуются плотностью людей. Согласно существующим рекомендациям, в зоне ожидания комфортным считается расстояние между людьми чуть меньше одного метра. При движении комфортным считается расстояние в 2-3 метра между людьми. Критическая ситуация начинается при уменьшении этой дистанции до физического контакта людей друг с другом.

В случае пожара или другой чрезвычайной ситуации необходимо обеспечить безопасную эвакуацию посетителей. Российские нормы (Об утверждении методики определения расчетных величин пожарного риска в зданиях, сооружениях и строениях различных классов функциональной пожарной опасности/ Приказ МЧС РФ от 30.06.2009 N 382 (Зарегистрировано в Минюсте РФ 06.08.2009 N 14486) (Fire risk code for buildings 2009 EMERCOM of Russia); Федеральный закон от 22 июля 2008 г. №123-ФЗ «Технический регламент о требованиях пожарной безопасности» (Technical regulations on fire safety requirements. Federal law No. 123-FZ of July 22, 2008) требуют, чтобы при эвакуации соблюдались два условия: беспрепятственность и своевременность. Беспрепятственность означает, что на пути эвакуации не происходит скопления людей с плотностью более 3.5 человека на квадратный метр продолжительностью более 6 минут. Своевременность эвакуации означает, что по пути следования в безопасное место на людей не происходит воздействие опасных факторов (например, задымления) при концентрациях, превышающих предельно допустимые значения.

3.1 Клиентские группы

Для многих крупных мероприятий существует понятие «клиентские группы». В нашем рассмотрении важно, что зрители разных клиентских групп имеют разграничения по доступу к различным частям здания.

Футбольные игры клубного уровня предполагают выделение специальной зоны на трибунах для болельщиков домашней и гостевой команд (так называемых фан-зон). Под фан-зоны команд выделяются трибуны, максимально удаленные друг от друга. По возможности обеспечиваются максимально разнесенные в пространстве и времени маршруты загрузки и выгрузки со стадиона соответствующих групп зрителей. Рационально уже при проектировании стадионов продумывать реализацию таких особенностей их эксплуатации. Для построенных зданий подобные вопросы могут быть решены за счет организационных мер (но известно, что организационные меры менее устойчивы к влиянию человеческого фактора). Разработанные решения могут быть протестированы с помощью применения компьютерного моделирования.

На рис. 1 представлен план трибун, план 4-го этажа стадиона и внешнего стилобата на уровне 4-го этажа. Из рис. 1 видно, что основная масса зрителей покидает трибуны через 4-ый этаж и далее выходит наружу на внешний стилобат. Для болельщиков гостевой команды (примерно 1600 человек), предусмотрен отдельный маршрут внутри стадиона через зрительское фойе на 3-м этаже (рис. 1, рис. 2), куда они попадают, спускаясь по внутренней лестнице с 4-го этажа. Особенности данного пути следующие: направление движения по маршруту не сонаправлено с выходом с 3-го этажа (требуется поворот на 180 градусов), сумма ширин проходов трибун (источников) больше ширины марша лестницы (4.8 м против 3 м соответственно). Наличие поворота на 180 градусов влечёт замедление потока в районе поворота на 3-м этаже. Другая особенность способствует тому, что пропускная способность лестницы ниже, чем интенсивность подходящего потока при максимальной нагрузке (одновременном движении всех зрителей гостевых трибун). Это приводит к максимальной плотности на лестнице и, как следствие, снижению скорости.

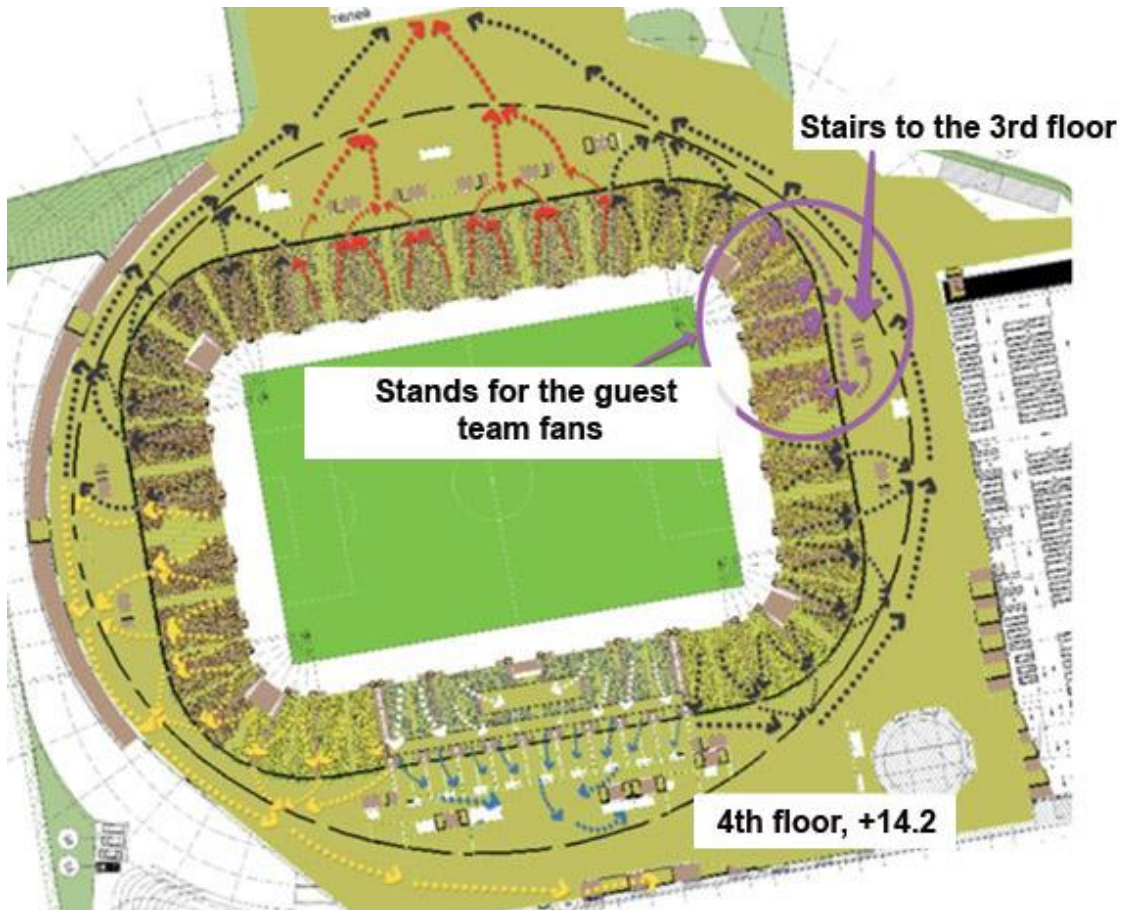


Рис. 1 – Схема движения зрителей со стадиона
 Fig. 1 – Routes of spectators movement out of the stadium



Рис. 2 – Маршрут болельщиков гостевой команды по лестнице с 4-го на 3-й этаж, по 3-му этажу до выхода из здания стадиона
 Fig. 2 – Route of the guest team fans down the stairs from the 4th to the 3rd floor, on the 3rd floor to the exit of the stadium building

В совокупности особенности планировки стадиона и соответствующей организации маршрута болельщиков гостевой команды дают значимое замедление потока и продолжительное скопление на 4-м этаже. Применение компьютерного моделирования позволяет давать не только качественные оценки, но и количественные. На рис. 3 представлено поле интенсивности скоплений, которое на момент t (в данном случае $t=530$ с это момент освобождения 4-го этажа болельщиками гостевой команды) показывает участки с нулевой или

близкой к нулю скоростью. Интенсивность скопления выражается в количестве времени (секунды), которое люди или стояли, или двигались с близкой к нулю скоростью за период с момента времени 0 к моменту t . Как видно из рис. 3, скопление в створе лестницы, ведущей на 3-й этаж, продолжалось более 360 секунд.

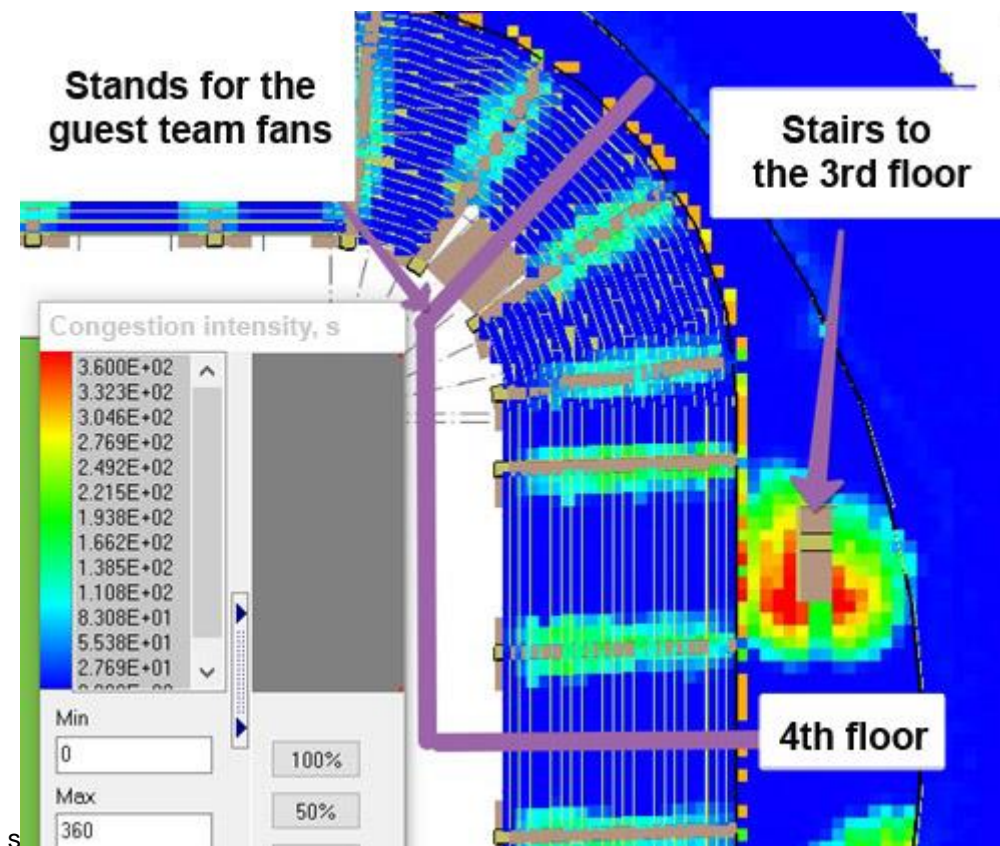


Рис. 3 – Поле интенсивности скоплений на 4-м этаже к 530 секунде
Fig. 3 – The field of congestion intensity on the 4th floor, $t=530$ second

Таким образом, зонирование по доступности клиентским группам требует сопутствующего анализа разрабатываемых решений с помощью моделирования. В рассмотренном примере показан потенциальный источник опасности из-за продолжительного скопления, нивелировать которое можно применив управление для организации поэтапной выгрузки трибун гостевых болельщиков и сменив место их размещения. Например, переместив трибуны для болельщиков гостевой команды на соседнюю часть южного сектора.

3.2. Организация движения на прилегающей территории

Быстрее всего поток людей (особенно плотный поток) движется по прямолинейным путям. Это следует учитывать при проектировании самих стадионов, прилегающей территории, внешнего периметра безопасности и при наполнении прилегающей к стадиону территории объектами временной инфраструктуры.

Расположение ворот для выхода с прилегающей территории следует согласовывать с выходами со стадиона, чтобы обеспечить наиболее прямолинейную траекторию. На практике встречаются противоположные ситуации, когда для достижения цели поток должен поменять направление движения вплоть до 180 градусов [40].

Наглядно визуализировать последствия такого решения можно с помощью компьютерного моделирования пешеходных потоков. На рис. 4, 5 продемонстрировано образование локальных скоплений на двух разных стадионах в схожих условиях в зоне поворотов.

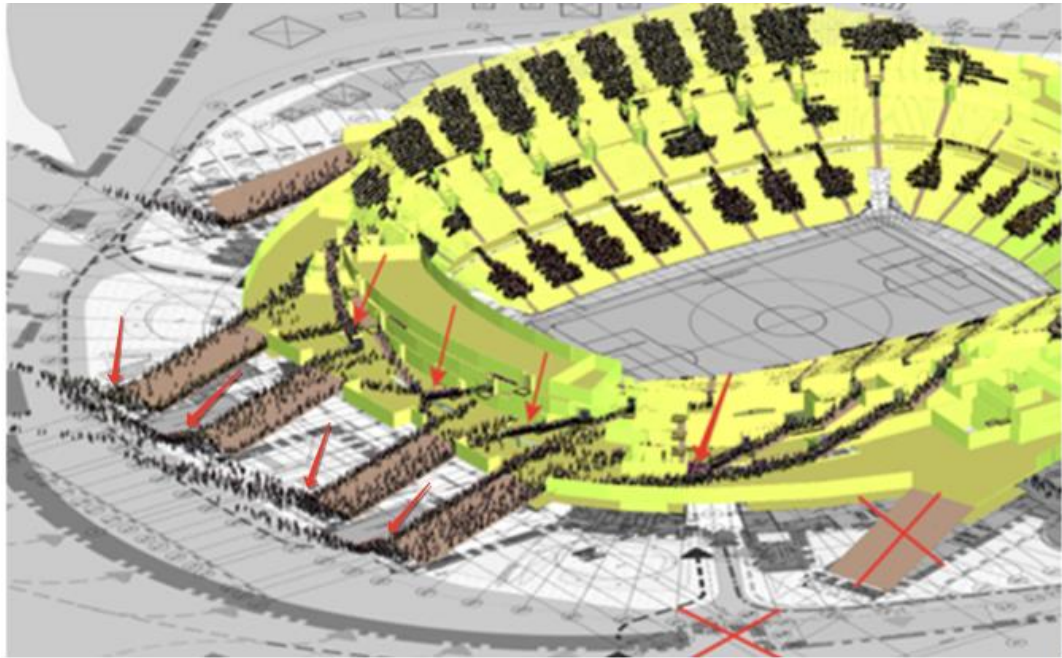


Рис. 4 – Визуализация эвакуации при полной загрузке стадиона, указаны участки, где реализуются скопления

Fig. 4 – Evacuation from the stadium, congestions are pointed

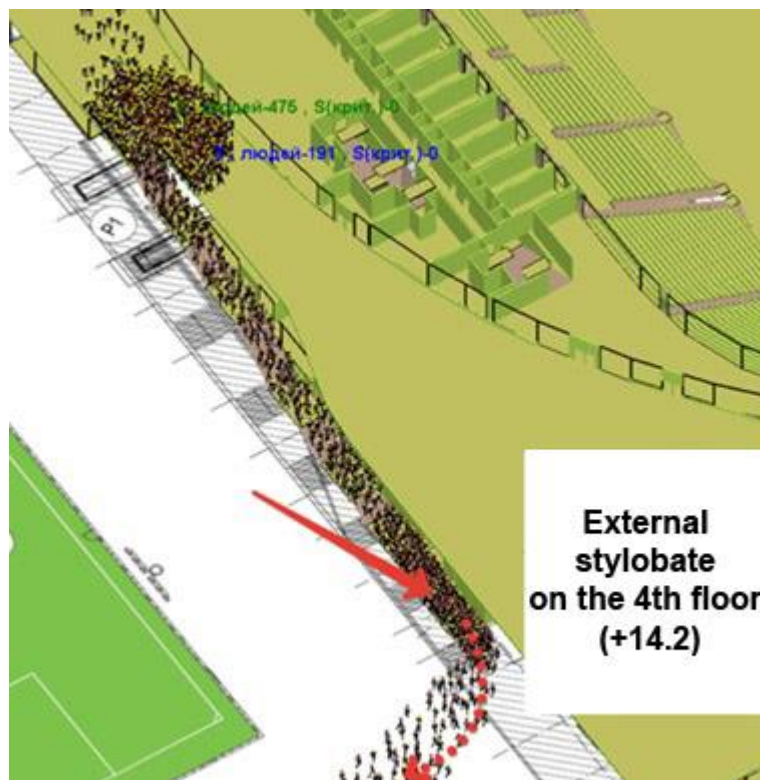


Рис. 5 – Скопление на лестнице перед поворотом в сторону ворот

Fig. 5 – Congestion on the stairs before turning towards the gate

Механизм образования скоплений связан с тем, что на повороте люди замедляются. Так же «включается» стратегия кратчайшего пути, которая имеет тенденцию минимизировать расстояние от центра поворота, за счет этого люди, находящиеся ближе к центру поворота, оказываются стесненными в движении (зажатыми), а основное движение происходит по периферии [49].

3.3. Объемно-планировочное решение

Особенности планировки здания могут создавать затруднения в движении людей и ситуации, когда образующиеся потоки препятствуют движению друг друга. Ограничения при проектировании могут быть разные, например, встраивание нового стадиона в существующую плотную застройку, особенности рельефа местности, как на рис. 6.

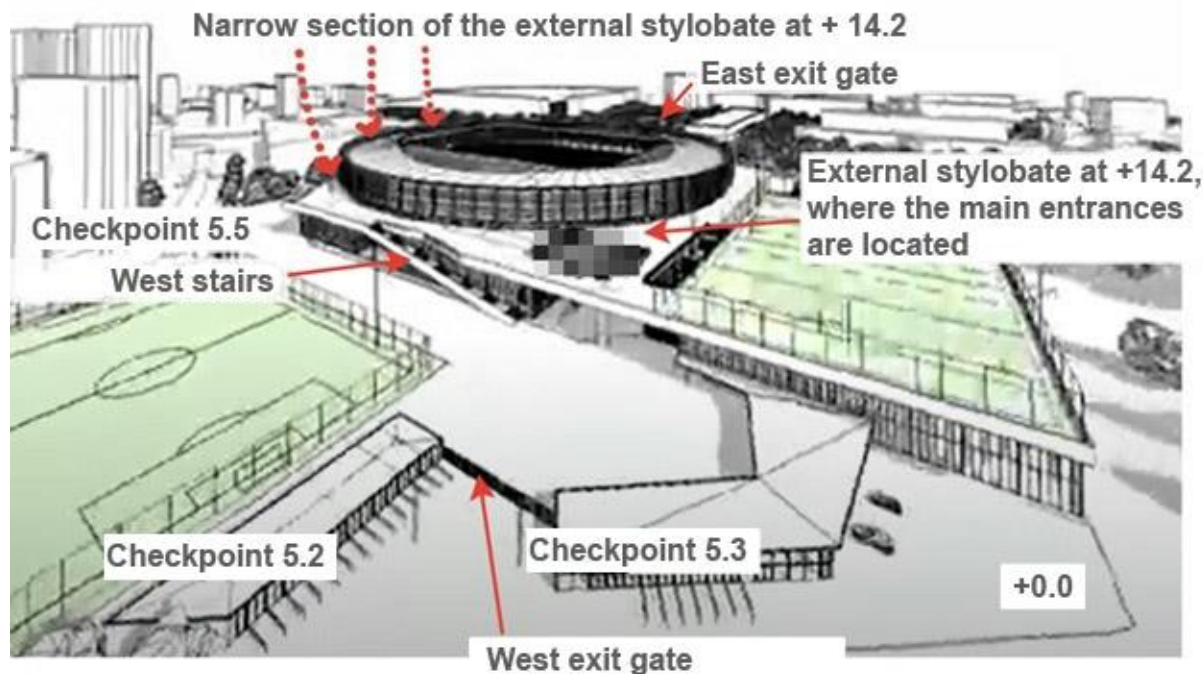


Рис. 6 – Планировочное решение территории, прилегающей к зданию стадиона, внешний стилобат

Fig. 6 – The plan of the stadium adjacent area, external stylobate

В силу естественного рельефа местности прилегающая территория имеет перепад высот более чем 14 метров, рис. 6. На отметке +14.2 располагается внешний стилобат, где находятся основные выходы из здания. Ворота за пределы внешнего периметра располагаются на отметке +0.0 с западной стороны и на отметке +14.2 с восточной стороны. Переход между территорией на отметке 0 и внешним стилобатом на отметке +14.2 осуществляется через наружные лестницы с западной и южной стороны стадиона. Такая организация прилегающей территории и выходов за пределы периметра ведет к круговому движению по внешнему стилобату. В штатном режиме выход с трибун осуществляется через внутренний стилобат на отметке +14.2 и выходы на внешний стилобат на отметке +14.2, рис. 1. Далее, вокруг здания по внешнему стилобату к восточным воротам, либо к западной лестнице и к западным воротам. При круговом движении «включается» стратегия кратчайшего пути, которое реализуется в тяготении траектории движения к центру поворота. И тем самым, люди, идущие по внешнему стилобату, препятствуют выходу находящимся в здании, что приводит к существенным скоплениям у выходов на внешний стилобат, рис. 7.

Из рис. 8 видно, что наиболее продолжительные скопления имеют место на выходах А1 и Г3, причиной этого является описанное круговое движение. Так, выходы А1 и А2 симметрично расположены и имеют одинаковую нагрузку (1130 человек), но выход А2 освобождается за 290 секунд, А1 освобождается за 410 секунд). Симметричные выходы Б2 и Г3 с нагрузкой примерно 900 человек на каждый освобождаются за 270 секунд (Б2) и 420 секунд (Г3).

На южной стороне можно снимать напряженность на выходе Г3 за счет организационных мер, выраженных в выставлении рассечек (барьеров) с целью направления потоков. На рис. 9 представлен вариант установки барьеров для разделения потоков. Эта мера также улучшит ситуацию на выходе Г4. В то же время аналогичные меры нельзя применять для северного стилобата, поскольку его ширина не превышает 5 м. В этом случае решением может быть

только поэтапная выгрузка трибун северной и северо-западной частей чаши. Поэтапная выгрузка также решит вопрос скопления в створе западной лестницы, рис. 7, рис. 8, которое образуется в силу меньшей пропускной способности лестницы по сравнению с интенсивностью подходящего потока. Ширина лестницы не превышает 3.5 метров.

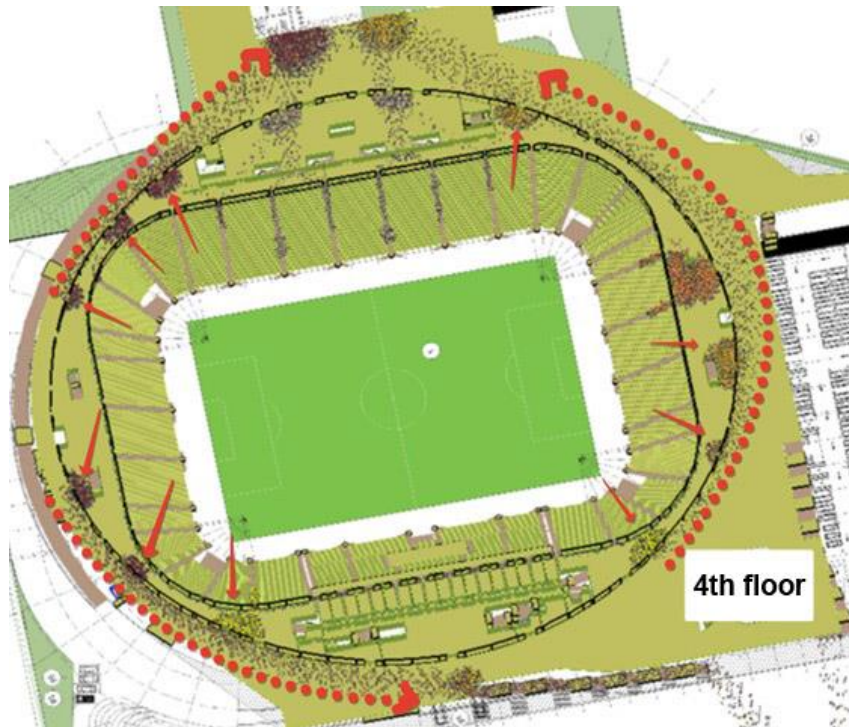


Рис. 7 – Положения людей через 200 секунд от начала единовременной разгрузки стадиона, образовавшиеся скопления на выходах из здания стадиона
 Fig. 7 – Positions of people 200 seconds latter the start of outflow, congestions at the exits of the stadium

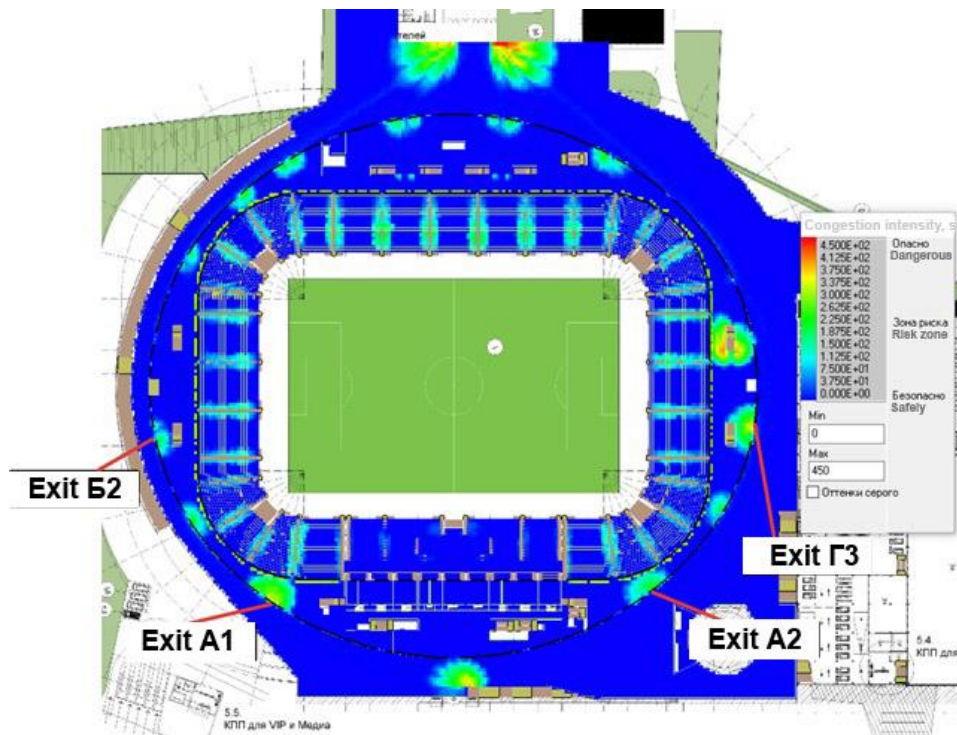


Рис. 8 – Поле интенсивности скоплений на 4-м этаже к 530 секунде (к освобождению 4 этажа)
 Fig. 8 – The field of congestion intensity on the 4th floor (all the floor), t=530 second

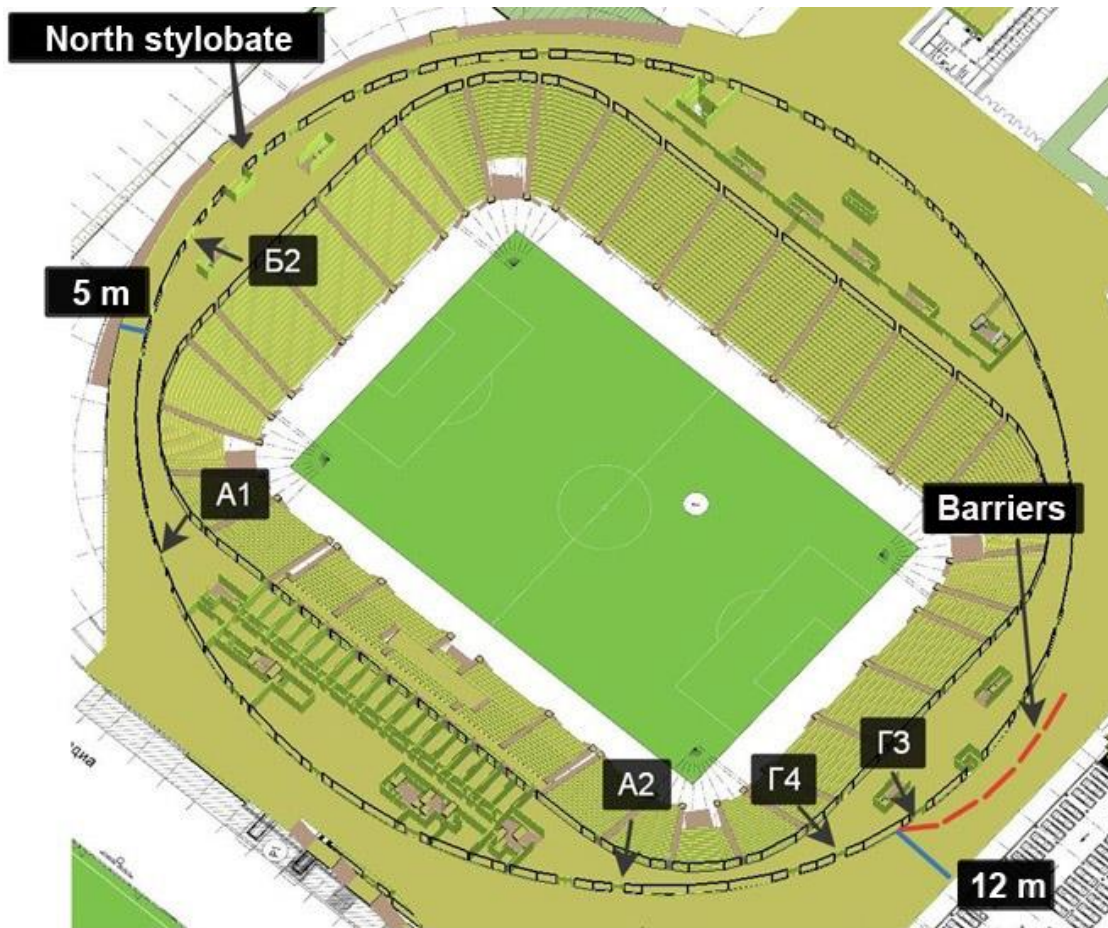


Рис. 9 – Расположение барьеров на южном стилобате, ширина внешних южного (12 м) и северного (5 м) стилобатов, обозначение выходов на внешний стилобат
 Fig. 9 – Location of barriers on the south stylobate, width of the outer south (12 m) and north (5 m) stylobates, the designation of exits to the outer stylobate

3.4. Влияние временной инфраструктуры

На прилегающей к зданию стадиона территории обычно располагаются объекты временной инфраструктуры: торговые палатки, шатры для приема гостей, специальные зоны для определенных клиентских групп, малые архитектурные формы, декоративные элементы и т. д. В режиме загрузки, как правило, отсутствуют массовые единовременные перемещения плотных масс людей. В силу специфики процесса происходят распределенные в пространстве и времени перемещения по территории. В этом случае такие элементы оказывают малое влияние на процесс. Однако, следует проверять расположение временных объектов в режиме единовременных процессов выгрузки и эвакуации с объекта, поскольку они могут служить препятствием, влекущим замедление движения.

В отдельных случаях подобные объекты могут снижать пропускную способность ворот. На рис. 10 представлен план расположения ворот, предназначенных для выхода за пределы территории объекта и декоративные элементы, запланированные на прилегающей территории. На рис.11 представлено поле интенсивности движения в режиме эвакуации с объекта. Обращают на себя внимание позиции 1 и 2, где происходят локальные увеличения интенсивности движения и, как следствие, замедление скорости. Причиной этого эффекта являются декоративные конструкции, которые служат препятствием для движения людей к воротам. Их приходится обходить (удлинять путь), вследствие чего происходит уплотнение потока и замедление движения.

Также эти конструкции являются существенным препятствием на пути к воротам 2 КПП 2.1 и воротам 2 КПП 2.2, рис. 10. Их приходится огибать (совершать поворот примерно на 90 градусов), что приводит к образованию скопления перед поворотом. Этот факт существенно затрудняет использование данных ворот. При моделировании они были исключены, 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

использовались только ворота 1 КПП 2.1 и ворота 1 КПП 2.2, рис. 11. Перенос деревянных конструкций в центр площадки перед центральным входом позволит равноценно использовать все ворота и ускорит освобождение территории объекта.

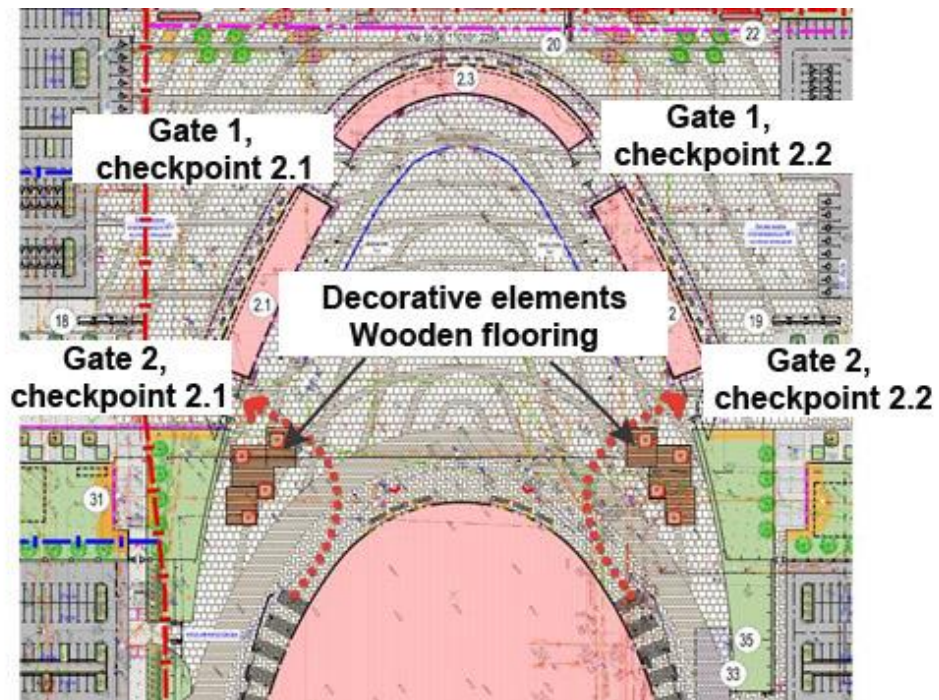


Рис. 10 – Расположение ворот и декоративных элементов на прилегающей территории
 Fig. 10 – Location of gates and decorative elements in the adjacent area

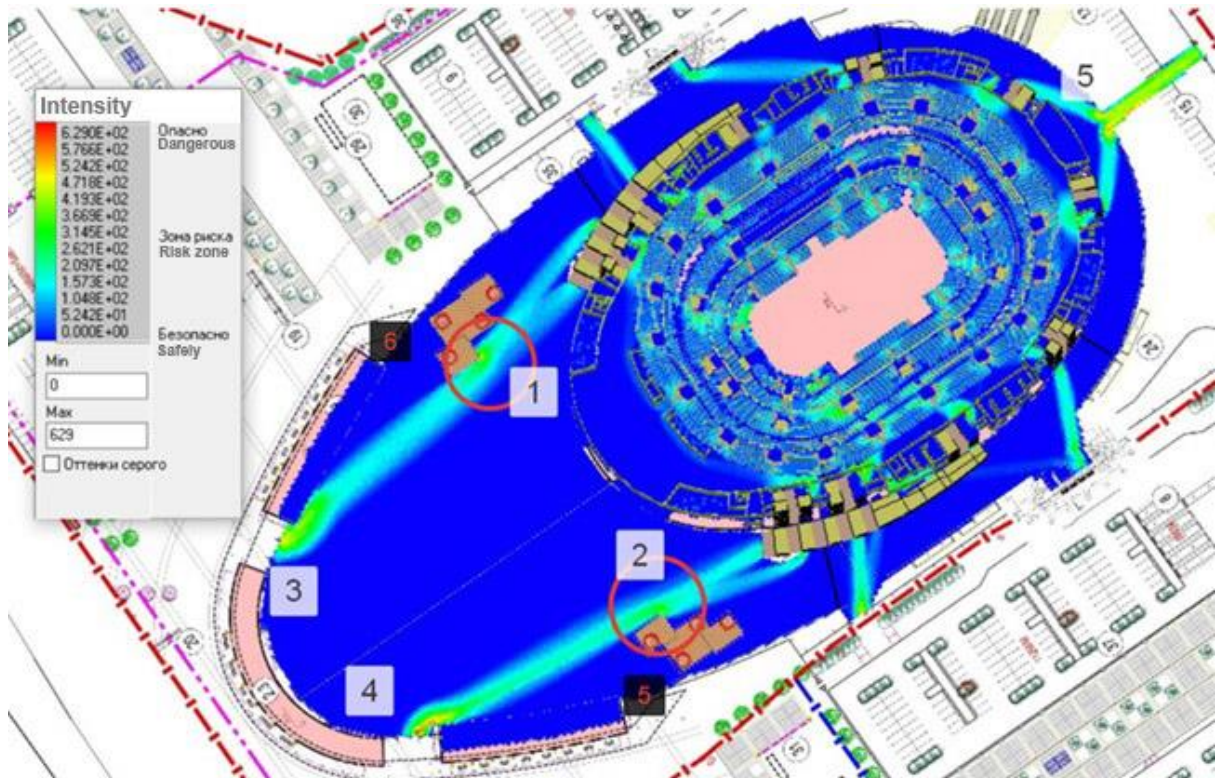


Рис. 11 – Влияние временной инфраструктуры на прилегающей территории на движение людских потоков при выгрузке. Поле интенсивности движения по прилегающей территории стадиона
 Fig. 11 – The impact of temporary infrastructure in the adjacent area on the outflow movement. The intensity field of movement on the stadium adjacent area

4 Conclusions

Имитационное моделирование движения людей применено для изучения влияния различных условий (сценариев) на безопасность и комфорт людей на стадионах и прилегающей территории. Изучалось влияние дифференциации мест на трибунах и территории по доступности определенным клиентским группам, влияние объемно-планировочного решения стадиона и прилегающей территории, расположения временной инфраструктуры.

Применение компьютерного моделирования пешеходных потоков и анализ полученных результатов позволяют выявить зоны, где создается потенциальная угроза для людей во время движения. Наиболее ярко такие особенности себя проявляют при экстремальных ситуациях: при максимальной загрузке объекта или чрезвычайной ситуации, когда на путях одновременно скапливается критическая масса людей. Зоны можно разделить на две категории: устранимые/условно устранимые (даже в условиях завершеного строительства, особенно это относится к временной инфраструктуре, ограничению доступа по принципу клиентских групп, внешнему периметру) и регулируемые с помощью организационных мер.

Анализ полученных результатов позволил выработать следующие рекомендации:

- 1) необходимо по возможности обеспечивать наиболее прямолинейную траекторию движения, так как замедление и, как следствие, скопления возникают в зоне поворотов;
- 2) расположение ворот для выхода с прилегающей территории следует согласовывать с выходами из здания стадиона;
- 3) расположение временной инфраструктуры должно согласовываться с беспрепятственностью основных пешеходных магистралей;
- 4) организационные меры (поэтапная разгрузка стадиона, изменение рассадки зрителей на трибунах, установка рассечек (барьеров) с целью направления потоков) могут снизить нагрузку на проблемные зоны, но их следует тестировать путем применения компьютерного моделирования.

Представленный способ изучения объекта является безопасным для людей, позволяет проигрывать широкий спектр ситуаций, разрабатывать меры на основе анализа полученных результатов, проверять разработанные решения.

5 Acknowledgements

Работа выполнена в рамках Соглашения между ФГБУ ВНИИПО МЧС России и ФГБНУ «ФИЦ «Красноярский научный центр Сибирского отделения Российской академии наук».

References

1. Stampede at Honduras stadium kills 5, injures dozens ahead of national football finals. URL: <https://www.rt.com/sport/390021-stampede-tegucigalpa-football-stadium/> (date of application: 27.12.2020).
2. Angola stadium stampede in Uige kills 17. URL: <https://www.bbc.com/news/world-africa-38939723> (date of application: 26.12.2020).
3. Egypt football violence leaves many dead in Port Said. URL: <https://www.bbc.com/news/world-middle-east-16845841> (date of application: 28.12.2020).
4. Kenya football stampede kills seven. URL: <https://www.bbc.com/news/world-africa-38939723> (date of application: 26.12.2020).
5. 82 fans die in World Cup stadium crush. URL: <https://www.independent.co.uk/news/world/82-fans-die-in-world-cup-stadium-crush-1358912.html> (date of application: 26.12.2020).
6. 1989: Football fans crushed at Hillsborough. URL: http://news.bbc.co.uk/onthisday/hi/dates/stories/april/15/newsid_2491000/2491195.stm (date of application: 28.12.2020).
7. The death toll in a 1982 soccer... URL: <https://www.latimes.com/archives/la-xpm-1989-07-22-sp-3399-story.html> (date of application: 28.12.2020).
8. Music: The Stampede to Tragedy. URL: <http://content.time.com/time/subscriber/article/0,33009,920746,00.html> (date of application: 28.12.2020).
9. Lima 1964: The world's worst stadium disaster. URL: <https://www.bbc.com/news/magazine->

- 27540668 (date of application: 28.12.2020).
10. Chraibi, M., Seyfried, A., Schadschneider, A. Generalized centrifugal-force model for pedestrian dynamics. *Phys. Rev. E*. 2010. 82(4). Pp. 46111. DOI:10.1103/PhysRevE.82.046111. URL: <https://link.aps.org/doi/10.1103/PhysRevE.82.046111>.
 11. Helbing, D., Farkas, I., Vicsek, T. Simulating dynamical features of escape panic. *Nature*. 2000. 407(6803). Pp. 487–490. DOI:10.1038/35035023. URL: <https://doi.org/10.1038/35035023>.
 12. Kirchner, A., Schadschneider, A. Simulation of evacuation processes using a bionics-inspired cellular automaton model for pedestrian dynamics. *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications*. 2002. 312(1). Pp. 260–276. DOI:[https://doi.org/10.1016/S0378-4371\(02\)00857-9](https://doi.org/10.1016/S0378-4371(02)00857-9). URL: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0378437102008579>.
 13. 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.
 14. Nishinari, K., Kirchner, A., Namazi, A., Schadschneider, A. Extended floor field CA model for evacuation dynamics. *IEICE Transactions on Information and Systems*. 2003. E87-D(3). Pp. 726–732. URL: <https://arxiv.org/pdf/cond-mat/0306262.pdf>.
 15. 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.
 16. Kirik, E., Malyshev, A., Senashova, M. On the Evacuation Module SigmaEva Based on a Discrete-Continuous Pedestrian Dynamics Model. *Parallel Processing and Applied Mathematics*. Springer International Publishing. Cham, 2016. Pp. 539–549. DOI: 10.1007/978-3-319-32152-3_50.
 17. 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:10.1016/j.csfs.2015.12.002. URL: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2214398X15300066>.
 18. 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.
 19. 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:<https://doi.org/10.1016/j.sbspro.2013.11.167>. URL: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1877042813045588>.
 20. Boltz, M., Seyfried, A. Collecting pedestrian trajectories. *Neurocomputing*. 2013. 100. Pp. 127–133. DOI:<https://doi.org/10.1016/j.neucom.2012.01.036>. URL: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0925231212003189>.
 21. Dridi, M. 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.
 22. 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>.
 23. Khan, S.D., Vizzari, G., Bandini, S. A computer vision tool set for innovative elder pedestrians aware crowd management support systems. *CEUR Workshop Proceedings*. 18032017. Pp. 75–91.
 24. 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.
 25. 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.
 26. 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:<https://doi.org/10.1016/j.trc.2013.02.016>. URL: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0968090X13000557>.

27. 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:<https://doi.org/10.1016/j.procs.2015.05.048>. URL: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1877050915008480>.
28. 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(1). Pp. 30. DOI:10.1007/s10458-020-09454-x. URL: <https://doi.org/10.1007/s10458-020-09454-x>.
29. Gravit, M., Dmitriev, I., Kuzenkov, K. Phased evacuation algorithm for high-rise buildings. *MATEC Web of Conferences*. 2018. 245. Pp. 11012. DOI:10.1051/mateconf/201824511012. URL: <https://doi.org/10.1051/mateconf/201824511012>.
30. Crowd dynamics. URL: <https://www.crowddynamics.com/> (date of application: 28.12.2020).
31. INCONTROL. URL: <https://www.incontrolsim.com/software/pedestrian-dynamics/> (date of application: 28.12.2020).
32. STEPS Mott MacDonald. URL: <https://www.steps.mottmac.com/> (date of application: 28.12.2020).
33. Legion. URL: <https://www.bentley.com/en/products/brands/legion> (date of application: 28.12.2020).
34. Oasys. URL: <https://www.oasys-software.com/products/pedestrian-simulation/> (date of application: 28.12.2020).
35. Pathfinder. URL: <https://www.thunderheadeng.com/pathfinder/> (date of application: 28.12.2020).
36. PedGo. URL: <https://www.traffgo-ht.com/en/pedestrians/products/pedgo/index.html> (date of application: 28.12.2020).
37. Simulex Thompson. URL: <https://www.iesve.com/software/virtual-environment/applications/egress/simulex> (date of application: 28.12.2020).
38. Anylogic. URL: <https://www.anylogic.ru/airports-stations-shopping-malls/> (date of application: 28.12.2020).
39. 3ksigma. URL: <https://3ksigma.ru/proektyi/> (date of application: 28.12.2020).
40. Kirik, E., Malyshev, A., Vitova, T., Popel, E., Kharlamov, E. Pedestrian movement simulation for stadiums design. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2018. 456(1). Pp. 012074. DOI:10.1088/1757-899X/456/1/012074. URL: <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1757-899X/456/1/012074>.
41. Kirik, E., Dekterev, A., Litvintsev, K., Malyshev, A., Kharlamov, E. The solution of fire safety problems under a design stadia with computer fire and evacuation simulation. {IOP} Conference Series: Materials Science and Engineering. 2018. 456. Pp. 012073. DOI:10.1088/1757-899x/456/1/012073. URL: <https://doi.org/10.1088%2F1757-899x%2F456%2F1%2F012073>.
42. Kirik, E., Vitova, T., Malyshev, A., Popel, E. A Conjunction of the Discrete-Continuous Pedestrian Dynamics Model SigmaEva with Fundamental Diagrams. *Parallel Processing and Applied Mathematics*. Springer International Publishing. Cham, 2020. Pp. 457–466. DOI: 10.1007/978-3-030-43222-5_40.
43. Kirik, E., Vitova, T. Pedestrian movement: analysis of real experiments in a straight corridor and validation of “Sigma SF” Software. *Fire Safety*. 2020. 1(98). Pp. 51–62. (rus)
44. Kholshvnikov, V. V., Shields, T.J., Boyce, K.E., Samoshin, D.A. Recent developments in pedestrian flow theory and research in Russia. *Fire Safety Journal*. 2008. 43(2). Pp. 108–118. DOI:<https://doi.org/10.1016/j.firesaf.2007.05.005>. URL: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0379711207000707>.
45. Kholshvnikov, V., Samoshin, D. Evakuaciya i povedenie lyudej pri pozharah [Evacuation and human behavior in fire]. Moscow: Academy of State Fire Service, EMERCOM of Russia, 2009. (rus)
46. Gwynne, S.M. V., Rosenbaum, E.R. Employing the Hydraulic Model in Assessing Emergency Movement. *SFPE Handbook of Fire Protection Engineering*. Springer New York. New York, NY, 2016. Pp. 2115–2151. DOI: 10.1007/978-1-4939-2565-0_59. DOI: 10.1007/978-1-4939-2565-0_59.
47. Weidmann, U. *Transporttechnik der Fussgänger*. IVT Schriftenreihe. 1993. DOI:10.3929/ethz-a-000687810.
48. Fruin, J.J. *Pedestrian Planning and Design*. New York: Metropolitan Association of Urban Designers and Environmental Planners, 1971.

49. Zhang, J., Klingsch, W., Rupprecht, T., Schadschneider, A., Seyfried, A. Empirical study of turning and merging of pedestrian streams in T-junction. arXiv preprint arXiv: 1112.5299. 2011. URL: <http://arxiv.org/abs/1112.5299>.