Pathfinder

THUNDERHEAD ENGINEERING

403 Poyntz Avenue, Suite B
Manhattan, KS 66502
USA
+1.785.770.8511
www.thunderheadeng.com

г. Екатеринбург, ул. Первомайская 66 - 4
+7 (343) 319-12-62
www.pyrosim.ru

Руководство по валидации и верификации

Pathfinder 2024.2

Оглавление

Оглавление 2
Отказ от ответственности 4
1. Введение 5
1.1. Режимы моделирования 5
1.2. Инерция 6
2. Тесты фундаментальных диаграмм 7
2.1. Фундаментальная диаграмма для однонаправленного потока 7
2.2. Фундаментальная диаграмма для двунаправленного потока 11
2.3. Фундаментальная диаграмма для слияния пешеходных потоков на Т-перекрестке 18
2.4. Настройка фундаментальной диаграммы для лестниц и пандусов 22
3. Испытания на скорость потока 30
3.1. Скорость потока через дверь 30
3.2. Скорость потока по лестнице 31
3.3. Скорость потока в коридоре 33
4. Поведенческие тесты 37
4.1. Зона безопасности как конечный пункт назначения 37
4.2. Групповое поведение 38
4.3. Слияние в коридорах 40
4.4. Слияние на лестницах 43
4.5. Обгон медленных агентов на лестнице 46
4.6. Загрузка лифта 48
4.7. Использование коридора при прохождении поворотов 50
5. Специальные возможности программы 53
5.1. Помощь при эвакуации 53
5.2. Скорость потока от источника агентов 64
5.3. Расчет дробной эффективной дозы FED 65
5.4. Снижение скорости движения из-за дыма 69
5.5. Социальное дистанцирование 71
6. Испытания IMO 73
6.1. Скорость передвижения (IMO_01) 73
6.2. Скорость движения по лестнице вверх (IMO_02) 74
6.3. Скорость движения по лестнице вниз (IMO_03) 75
6.4. Скорость потока через двери (IMO_04) 77
6.5. Время начальной задержки (IMO_05) 78
6.6. Огибание углов (IMO_06) 79
6.7. Несколько скоростей движения (IMO_07) 81

6.8. Противоток (IMO_08)....83
6.9. Чувствительность к доступным дверям (IMO_09)....86
6.10. Назначение выходов (IMO_10)....88
6.11. Скопления (IMO_11)....90
7. Эвакуационные испытания NIST....95
7.1. Распределение времени до эвакуации (Verif.1.1)....95
7.2. Скорость в коридоре (Verif.2.1)....95
7.3. Скорость на лестнице (Verif.2.2)....95
7.4. Огибание угла (Verif.2.3)....95
7.5. Назначенные демографические данные (Verif.2.4)....95
7.6. Снижение видимости в сравнении со скоростью ходьбы (Verif.2.5)....95
7.7. Вывод из строя агентов (Verif.2.6)....95
7.8. Использование лифта (Verif.2.7)....97
7.9. Горизонтальные противотоки (Verif.2.8)....100
7.10. Групповое поведение (Verif.2.9)....100
7.11. Люди с ограниченными возможностями передвижения (Verif.2.10)....103
7.12. Распределение маршрутов выхода (Verif.3.1)....106
7.13. Социальное влияние (Verif.3.2)....106
7.14. Принадлежность (Verif.3.3)....106
7.15. Динамическая доступность выходов (Verif.4.1)....106
7.16. Скопления (Verif.5.1)....107
7.17. Максимальная скорость потока (Verif.5.2)....107
8. Тестовые задачи SFPE....108
8.1. Пример 1 Одно помещение и лестница (SFPE_1)....108
8.2. Пример 2 Пятиэтажное здание (SFPE_2)....110
Библиография....114

Отказ от ответственности

Thunderhead Engineering не дает никаких гарантий, выраженных или подразумеваемых, пользователям Pathfinder и не несет никакой ответственности за его использование. Пользователи Pathfinder принимают на себя исключительную ответственность в соответствии с федеральным законодательством за определение целесообразности его использования в любом конкретном случае; за любые выводы, сделанные на основе результатов его использования; и за любые действия, предпринятые или не предпринятые в результате анализа, проведенного с помощью этих инструментов.

Пользователей предупреждают, что Pathfinder предназначен для использования только теми, кто компетентен в области моделирования пешеходов. Pathfinder предназначен только для дополнения обоснованных суждений квалифицированного пользователя. Программный пакет представляет собой компьютерную модель, которая может обладать или не обладать предсказательной способностью при применении к определенному набору фактических обстоятельств. Отсутствие точных прогнозов модели может привести к ошибочным выводам. Все результаты должны оцениваться информированным пользователем.

1. Введение

В этом документе представлены данные верификационных и валидационных испытаний симулятора Pathfinder.

В настоящем документе используются следующие определения:

Верификация

Тестовые примеры, разработанные для того, чтобы убедиться, что симулятор работает в соответствии с техническим руководством Pathfinder. Обычно эти испытания направлены на изолирование конкретных моделируемых величин или поведения, и могут включать небольшое количество агентов. Этот тип испытаний часто имеет очень конкретные критерии прохождения/непрохождения.

Верификационные тесты гарантируют, что программное обеспечение правильно реализует модель - они не предназначены для измерения того, насколько точно эта модель отражает реальность.

Валидация

Тестовые примеры, разработанные для измерения того, насколько хорошо реализованные в Pathfinder имитационные модели отражают реальное поведение. Обычно эти тесты исследуют взаимодействие между несколькими элементами моделирования и могут иметь менее конкретные критерии прохождения/непрохождения. Валидационные тесты обычно основаны на экспериментальных данных или опыте (например, в определенном месте должен образоваться затор).

Использование терминов «верификация» и «валидация» в данном документе соответствует терминологии, представленной в стандарте IEEE 1012 ("IEEE 10122016 IEEE Standard for System, Software, and Hardware Verification and Validation” 2016) и ISO 167301 ("ISO 1673012015E Fire Safety Engineering - Procedures and Requirements for Verification and Validation of Calculation Methods” 2015.

ПРИМЕЧАНИЕ

Предыдущие версии этого документа до выхода версии 2020.1 Pathfinder можно найти на странице Pathfinder.

1.1. Режимы моделирования

Большинство тестовых примеров в этой главе выполняются с использованием трех различных конфигураций (режимов), основанных на опции «Режим поведения» и опции «Предельная скорость потока через дверь» в диалоговом окне «Параметры моделирования» Pathfinder».

- Симуляция «управляемое движение» Steering запускается с выбором режима поведения «управляемое движение». Это поведение Pathfinder по умолчанию, и все агенты используют систему рулевого управления для перемещения и взаимодействия с другими людьми, здесь нет ограничения скорости потока.

- Симуляция SFPE запускается с выбором режима поведения «SFPE». В этом режиме обитатели не пытаются избежать друг друга и могут пересекаться, но двери ограничивают поток, а скорость регулируется плотностью.
- Моделирование Steering+ SFPE выполняется с выбором режима поведения «Управляемое движение» и ограничением скорости потока через двери. Агенты используют управляемое движение для перемещения, но скорость потока через двери ограничена значениями SFPE.

В каждом случае все остальные параметры симулятора оставлены по умолчанию, если не указано иное. Для случаев, в которых изучается поведение скорости и плотности, применим только режим управляемого движения.

1.2. Инерция

Режим SFPE, поддерживаемый Pathfinder, позволяет агентам мгновенно переходить с одной скорости на другую без учета ускорения. Однако при прогнозировании результатов моделирования с использованием режима управляемого движения необходимо учитывать инерцию.

Если предположить, что агенту необходимо преодолеть некоторое расстояние d, это обычно делается следующим образом:

1. Вычисляется d1, используя следующее уравнение движения: $d1 = 0{,}5 * (v1 - v0) * t1$, где d1 - пройденное расстояние, v0 - начальная скорость, v1 - конечная скорость, t1 - время, необходимое для перехода от v0 к v1. В Pathfinder ускорение по умолчанию рассчитывается таким образом, чтобы агенты переходили от неподвижного состояния к движению с максимальной скоростью за 1,1 секунды. v0 обычно составляет ноль, а v1 - максимальная скорость агента.
2. Рассчитывается d2 как оставшееся расстояние, которое нужно пройти: $d2 = d - d1$.
3. Рассчитывается время t2, необходимое для прохождения оставшегося расстояния d2, используя уравнение: $t2 = d(2)/v1$.
4. Полное время t, необходимое для разгона с 0,0 м/с и прохождения расстояния d, определяется следующим образом: $t = t1 + t2$.

Инерция также влияет на эффективную скорость потока через двери для режима Steering+ SFPE, поскольку каждый агент должен ускориться, когда его пропускают через дверь.

2. Тесты фундаментальных диаграмм

В Pathfinder пользователь может задать профиль "скорость-плотность" - фундаментальную диаграмму. Поскольку скорость ходьбы людей может быть разной, пользователь задает нормализованный профиль. Профиль плотности-скорости для данного агента получается путем умножения скорости данного агента на нормализованный профиль плотности-скорости Рисунок 1. Нормированный профиль скорости-плотности по умолчанию соответствует спецификации SFPE (SFPE 2019) с той поправкой, что при высокой плотности скорость не равна нулю, а равна 0,15.

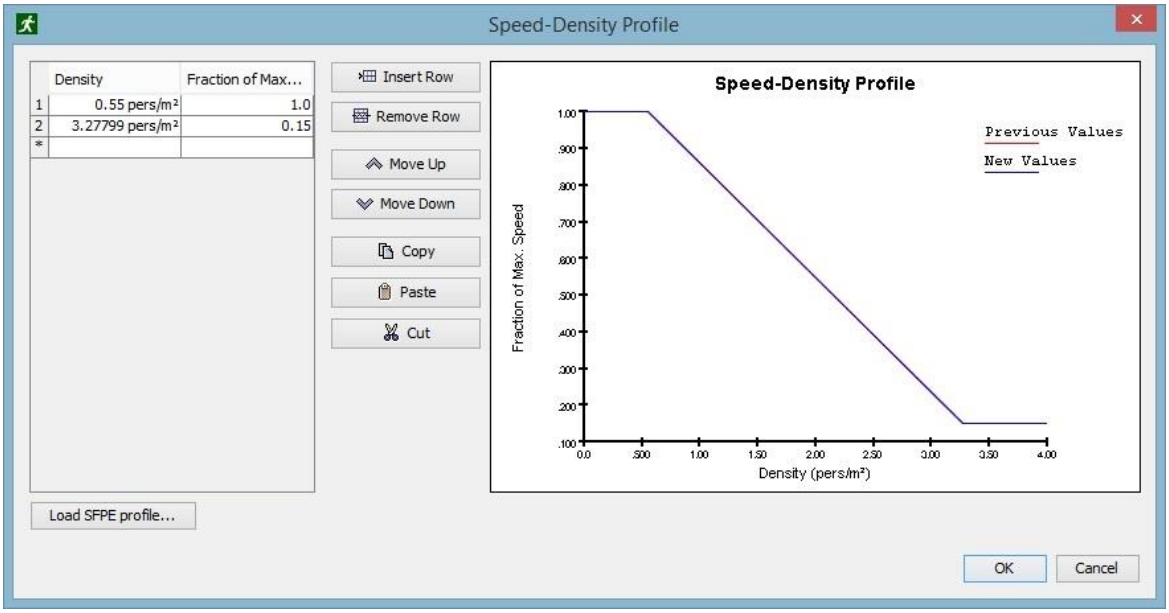


Рисунок 1. Профиль плотности-скорости SFPE по умолчанию

2.1. Фундаментальная диаграмма для однонаправленного потока

2.1.1. Введение

"Переходы в фундаментальных диаграммах пешеходов в прямых коридорах и на перекрестках Т " ("Упорядочение в двунаправленных пешеходных потоках и его влияние на фундаментальную диаграмму" Zhang и др. 2011 и "Эмпирические характеристики различных типов пешеходных потоков" Zhang и Seyfried 2013) описывают серию экспериментов, в которых они измеряли фундаментальную диаграмму, контролируя плотность коридоре путем изменения ширины входа и выхода. Рисунок 2.

Вы можете загрузить видеозаписи эксперимента и сопроводительную документацию из архива данных Pedestrian Dynamics (http://ped.fz-juelich.de/db/doku.php?id=start).

В данном примере мы рассмотрим результаты проверки однонаправленного потока.

Сводка экспериментальных результатов для однонаправленных и двунаправленных потоков показана на рисунке 3. Соответствующие кривые спецификации SFPE показаны на рисунке 4. По сравнению с расчетами SFPE, эксперименты Чжана и Сейфрида характеризуются более высокой скоростью измеренная свободная скорость 1,55± 0,18 м/с) и значительно более высоким измеренным удельным расходом (хотя в статье отмечаются

большие изменения удельного расхода при небольших изменениях в экспериментальной установке для плотностей более 2 перс/м2).

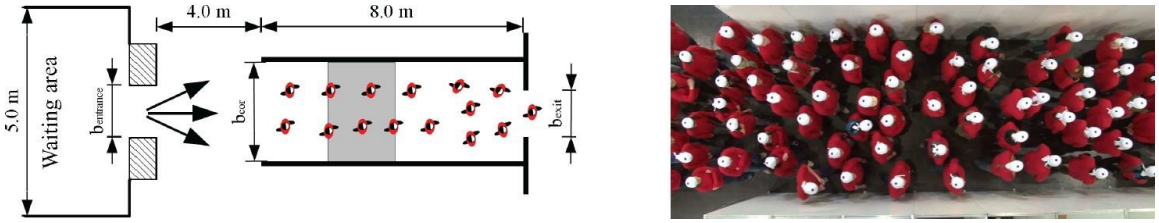


Рисунок 2. Установка и снимок эксперимента с однонаправленным потоком. Серая область на эскизе показывает расположение зоны измерений Zhang и Seyfried 2013.

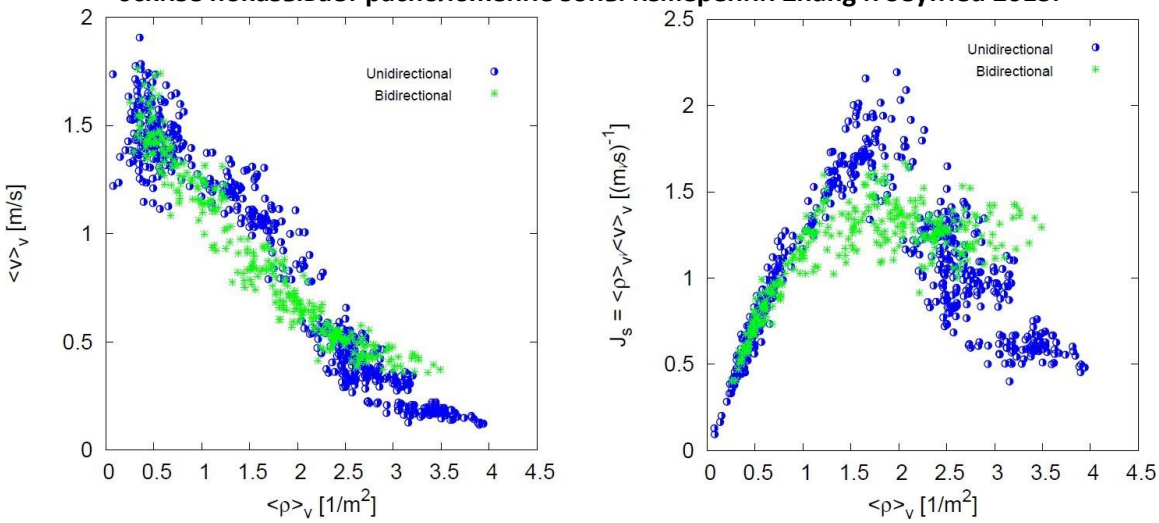


Рисунок 3. Сравнение принципиальных схем однонаправленного и двунаправленного пешеходного потока Zhang and Sey fried 2013.

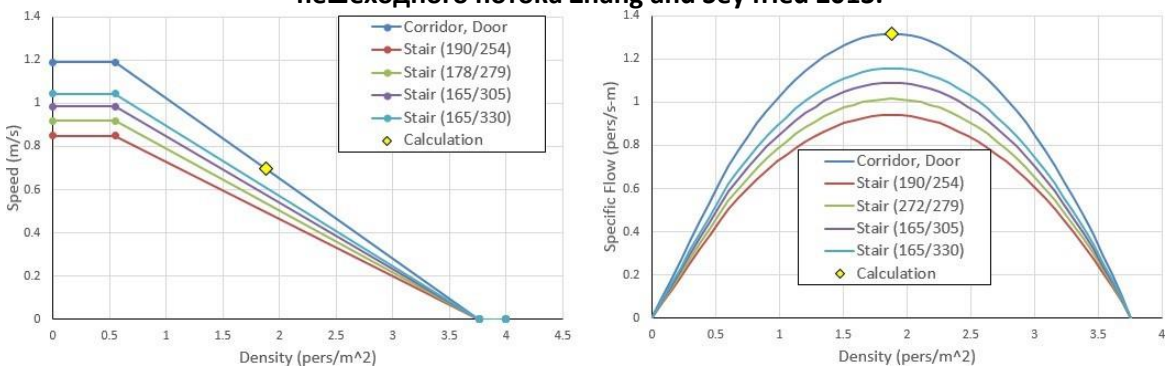


Рисунок 4. Фундаментальные диаграммы SFPE

2.1.2. Примечания по настройке

Модель Pathfinder показана на рисунке 5. Эта модель представляет собой подмножество экспериментов, описанных в работе "Переходы в фундаментальных диаграммах пешеходов на прямых коридорах и Т-образных перекрестках" Zhang и др. 2011. Модель Pathfinder использует 3 м коридора. В шести случаях ширина входа изменялась от 2 м до 3 м, а ширина выхода оставалась неизменной на уровне 3 м (это случаи низкой плотности), а в 10 случаях ширина входа оставалась неизменной на уровне 3 м, а ширина выхода изменялась от 3 м до 1 м (случаи высокой плотности). Красными прямоугольниками отмечены области, использованные для измерения плотности движения. Для обеспечения стабильных результатов в каждом случае использовалось 1000 человек.

Шестнадцать случаев были повторены для трех предположений скорости ходьбы:

- Значения Чжана и Сейфрида 1,55± 0,18 м/с при профиле скорости, показанном на рисунке 6 (который представляет собой экспериментальные данные скорости-плотности, показанные на рисунке 3.
- Постоянная скорость 1,19 м/с с учетом зависимости скорости от плотности SFPE Рисунок 1.
- Равномерное распределение скорости 1,19± 0,25 м/с с учетом зависимости скорости и плотности SFPE Рисунок 1.

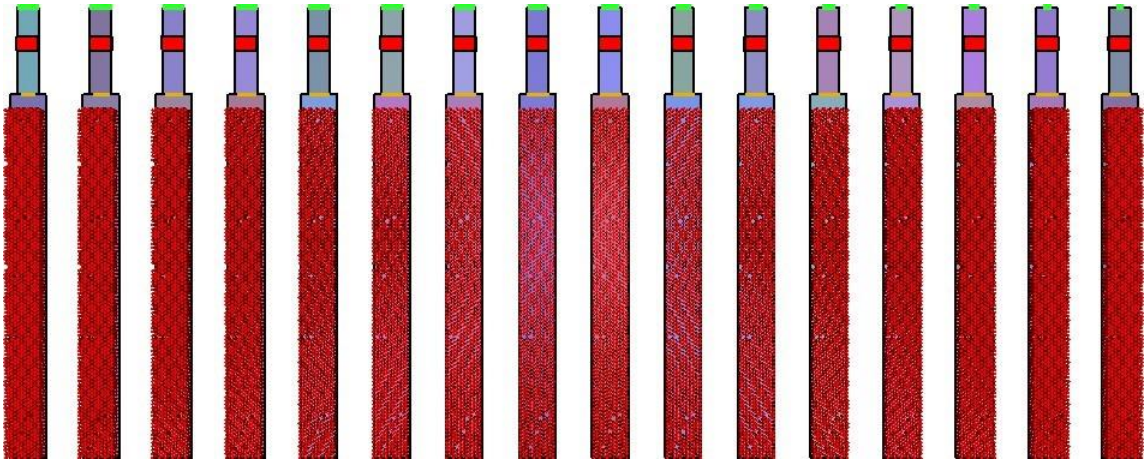


Рисунок 5. Модель траектории для однонаправленных экспериментов Чжана и Сейфрида.

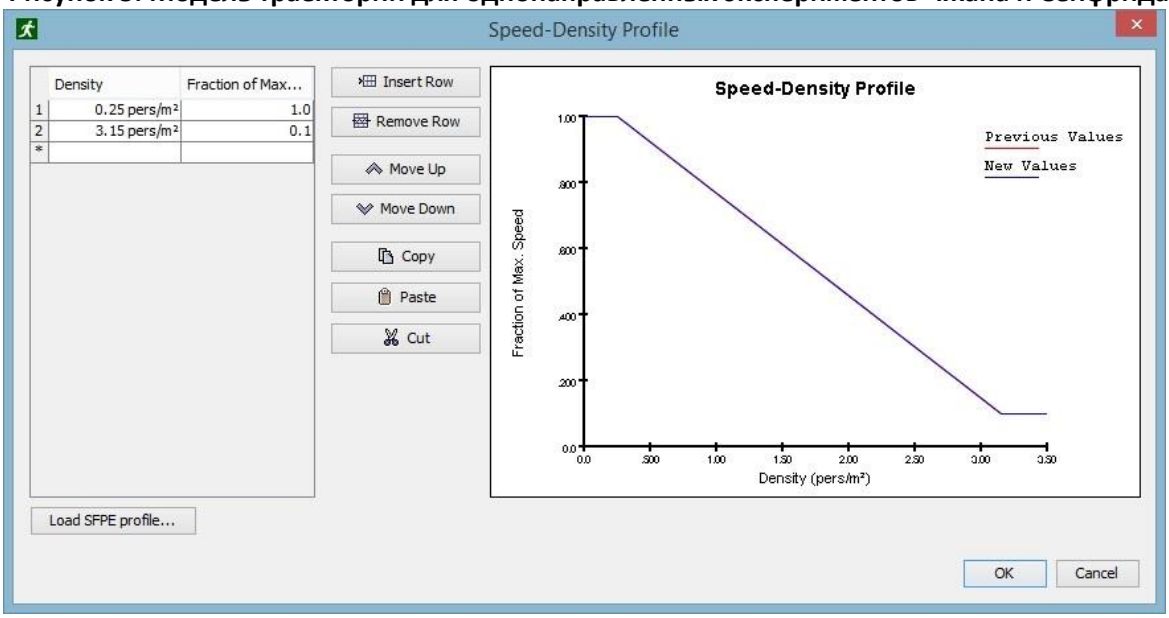


Рисунок 6. Входные данные, соответствующие экспериментальному профилю скорости-плотности Чжана и Сейфрида

2.1.3. Результаты

Результаты измерения плотности скорости и удельного потока для эксперимента Чжана и Сейфрида представлены для каждого из трех случаев. На этих кривых данные представлены за временные интервалы, когда были достигнуты "устойчивые" условия.

Серые точки представляют все рассчитанные пары "скорость-плотность" для всех коридоров.

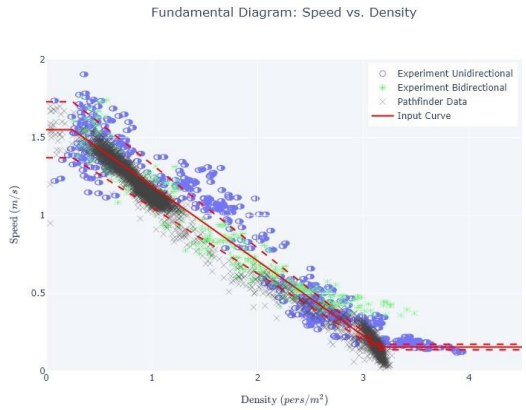


Рисунок 7. Результаты измерения плотности скорости с измеренной входной плотностью скорости и равномерной распределение скоростей 1,55± 0,18 м/с.

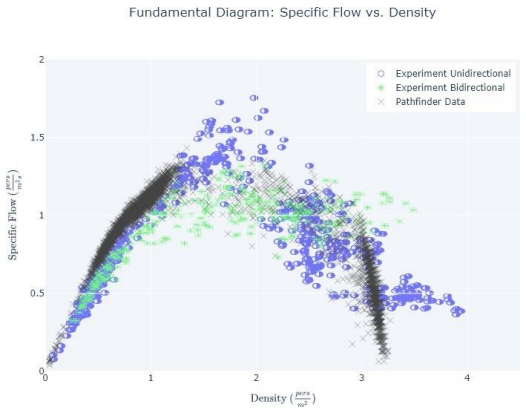


Рисунок 8. Результаты измерения удельного расхода плотности при измеренной скорости-плотности и равномерном распределение скоростей 1,55± 0,18 м/с.

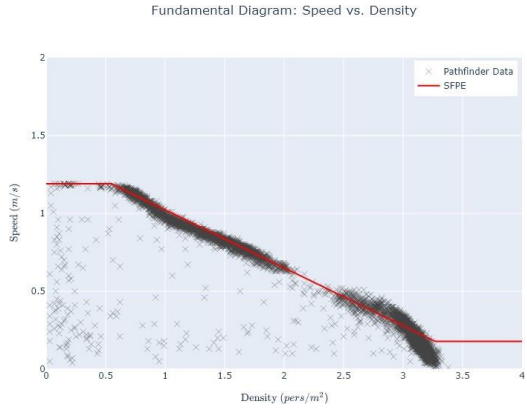


Рисунок 9. Результаты измерения плотности скорости при использовании SFPE с плотностью скорости и постоянной скоростью 1,19 м/с.

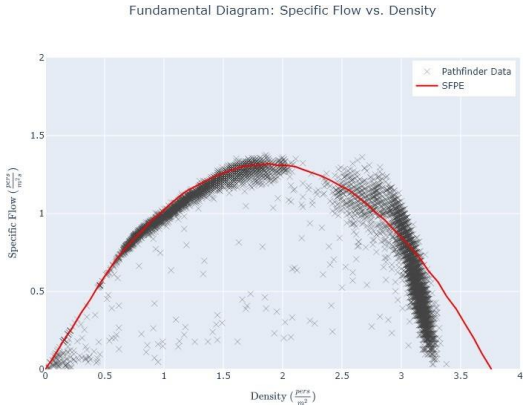


Рисунок 10. Результаты измерения удельного расхода плотности при использовании SFPE для измерения скорости-плотности и постоянной величины скорость 1,19 м/с.

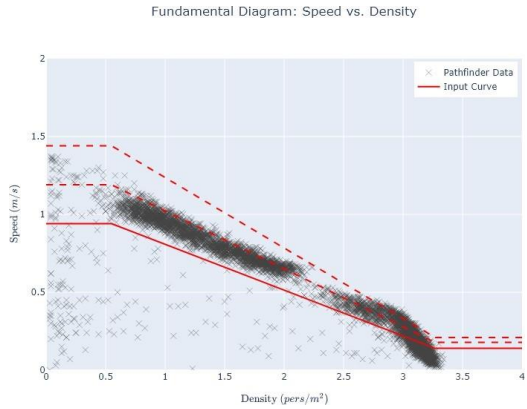


Рисунок 11. Результаты измерения плотности скорости при использовании входного сигнала плотности скорости SFPE и равномерной скорости распространение 1,19± 0,25 м/с.

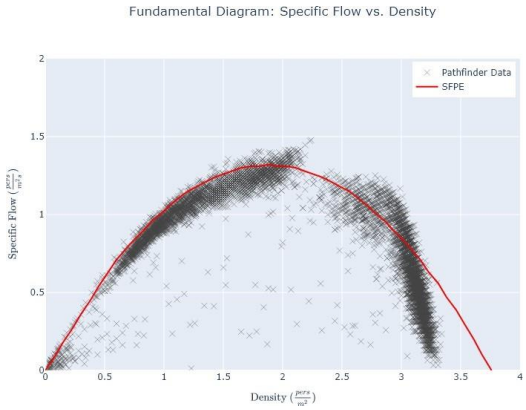


Рисунок 12. Результаты расчета удельного расхода плотности с учетом плотности-скорости SFPE и равномерности распределение скоростей 1,19± 0,25 м/с

2.1.4. Анализ

Расчеты Pathfinder повторяют кривую "скорость-плотность". Расчетные точки находятся немного ниже исходных кривых, что делает результаты несколько консервативными. Расчеты удельного расхода также соответствуют ожидаемым результатам. Сравнение показывает, что Pathfinder правильно использует в расчетах кривую "скорость-плотность".

2.2. Фундаментальная диаграмма для двунаправленного потока

2.2.1. Введение

Помимо однонаправленного потока, в работах Zhang and Seyfried (Zhang and Seyfried 2013) и Zhang, Klingsch, Schadschneider, and Seyfried (Zhang et al. 2011) описаны экспериментальные результаты для двунаправленного потока. Экспериментальные результаты для двунаправленного потока обобщены и сравниваются с результатами для однонаправленного потока на рисунке 3.

Экспериментальная установка показана на рисунке 13. Для сбалансированного соотношения потоков (Balanced Flow Ratio - BFR) ширина левого и правого входа была одинаковой. В ограниченном количестве испытаний использовался несбалансированный поток (Unbalanced Flow Ratio - UFR) с различной шириной входа. Измеренные фундаментальные диаграммы были одинаковыми для сбалансированного и несбалансированного потока.

Кроме того, участникам либо разрешалось выбирать направление выхода (слева или справа), или предписывалось направление. Когда участники выбирали направление входа, образовывались стабильные разделенные полосы (Stable Separated Lanes - SSL), но когда требовалось войти в заданном направлении, полосы становились нестабильными и менялись во времени и пространстве (Рисунок 14), что приводило к динамическому многополосному потоку (Dynamical Multi-Lanes - DML). На рисунках 15 и 16 показаны параметры для экспериментов.

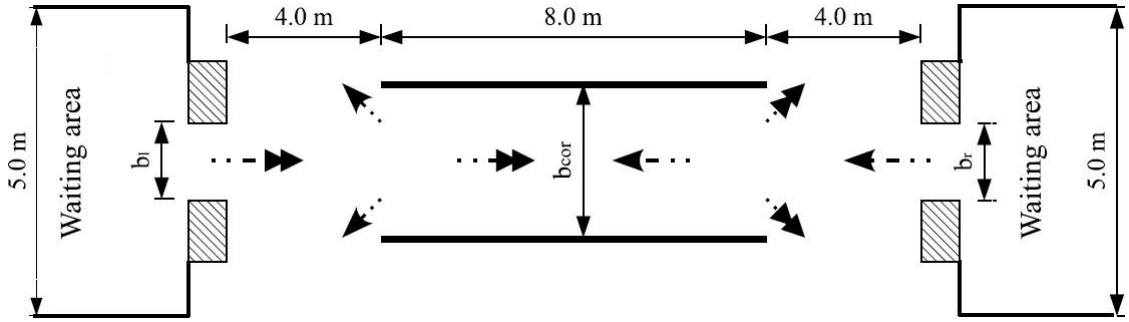


Рисунок 13. Установка и эксперимент с двунаправленным потоком. Ширина коридора, левого входа и правого входа варьировалась в эксперименте Zhang и Seyfried 2013.

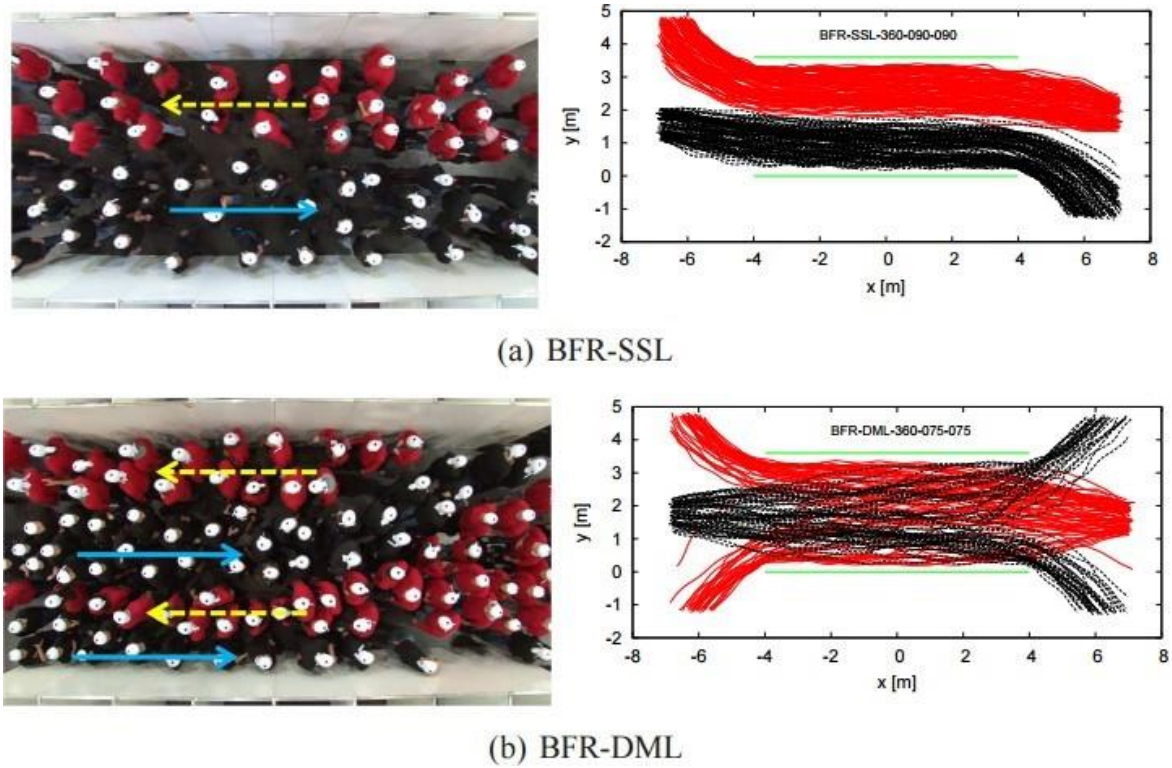


Рисунок 14. Изображения двунаправленных потоков для случая с равным количеством левых и правых участников BFR. Стабильные разделенные полосы SSL образуются, когда участники могут выбирать направление выхода, а динамические многополосные DML образуются, когда каждому участнику назначается выход либо слева, либо справа. В случае DML полосы движения нестабильны и меняются во времени и пространстве. Чжан и Сейфрид 2013.

Index	Name	b_{cor} [m]	b_l [m]	b_r [m]	N_l	N_r
1	BFR-SSL-360-050-050	3.60	0.50	0.50	57	61
2	BFR-SSL-360-075-075	3.60	0.75	0.75	56	80
3	BFR-SSL-360-090-090	3.60	0.90	0.90	109	105
4	BFR-SSL-360-120-120	3.60	1.20	1.20	143	164
5	BFR-SSL-360-160-160	3.60	1.60	1.60	143	166

Рисунок 15. Таблица экспериментальных параметров, используемых для определения коэффициента сбалансированного потока BFR и эксперименты по выбору выходов SSL. Чжан и Сейфрид 2013.

Index	Name	b_{cor} [m]	b_l [m]	b_r [m]	N_l	N_r
1	BFR-DML-300-050-050	3.00	0.50	0.50	54	71
2	BFR-DML-300-065-065	3.00	0.65	0.65	64	83
3	BFR-DML-300-075-075	3.00	0.75	0.75	61	86
4	BFR-DML-300-085-085	3.00	0.85	0.85	119	97
5	BFR-DML-300-100-100	3.00	1.00	1.00	125	105
6	BFR-DML-360-050-050	3.60	0.50	0.50	56	74
7	BFR-DML-360-075-075	3.60	0.75	0.75	62	65
8	BFR-DML-360-090-090	3.60	0.90	0.90	110	102
9	BFR-DML-360-120-120	3.60	1.20	1.20	115	106
10	BFR-DML-360-160-160	3.60	1.60	1.60	140	166
11	BFR-DML-360-200-200	3.60	2.00	2.00	143	166
12	BFR-DML-360-250-250	3.60	2.50	2.50	141	163

Рисунок 16. Таблица экспериментальных параметров, используемых для определения коэффициента сбалансированного потока BFR и назначенные выходы Динамические многополосные DML эксперименты Чжан и Сейфрид 2013.

По этой ссылке можно скачать видеозаписи эксперимента и сопроводительную документацию - Pedestrian Dynamics Data Archive (http://ped.fz-juelich.de/db/doku.php?id=start).

В данном примере проверки будут рассмотрены результаты двунаправленного потока.

2.2.2. Примечания по настройке

Модели Pathfinder использовались для моделирования экспериментальных случаев с коридором шириной 3,6 м. Модель BFR-SSL показана на рисунке 17. Ширина двух входных дверей всегда идентична друг другу, но ширина дверей меняется для регулирования плотности движения. Красными прямоугольниками отмечены области, используемые для измерения скорости и плотности потока. Измеренные экспериментальные скорости потока на входе использовались для задания временных историй источников, при этом использовалась опция принудительная скорость потока.

Для всех случаев использовалась измеренная скорость ходьбы 1,55± 0,18 м/с с профилем скорости, соответствующим однонаправленным данным плотности скорости, показанным на рисунке 6. Мы не изменяли профиль плотности-скорости для разных задач, а использовали однонаправленные данные плотности скорости для всех случаев. Цель состоит в том, чтобы алгоритм движения подстраивался под различные ситуации.

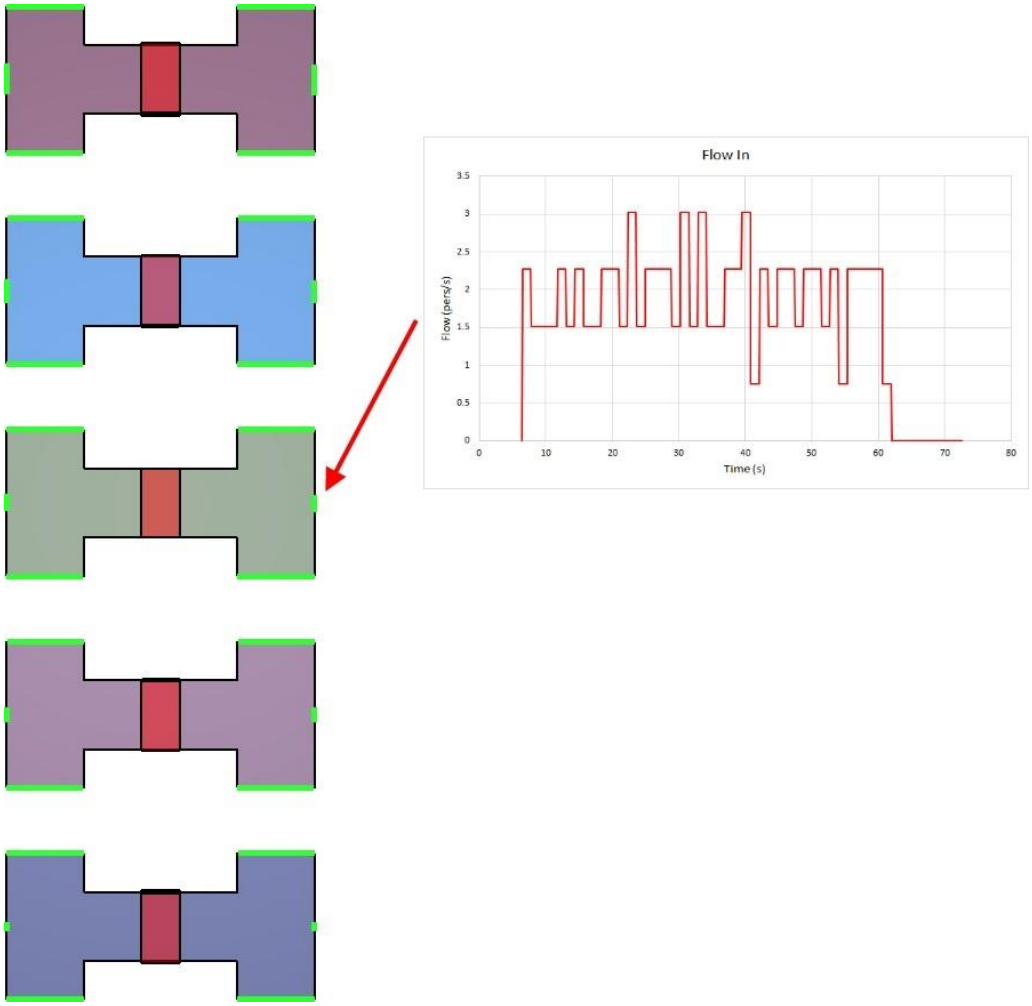


Рисунок 17. Модель Pathfinder для двунаправленного потока.

На рисунке 17 измеренные экспериментальные скорости входного потока используются для задания входных потоков в модели. Эта модель показывает эксперименты BFR SSL, аналогичная модель была использована для случаев BFR DML.

2.2.3. Результаты для коэффициента сбалансированного потока BFR и выбранных участниками выходов Стабильные разделенные полосы SSL

Результаты измерения плотности-скорости и удельного расхода представлены на Рисунке 18 и Рисунке 19. На этих кривых представлены временные интервалы, когда были достигнуты условия "устойчивого состояния". Серые точки представляют все рассчитанные пары "скорость-плотность" для всех коридоров.

На рис. 20 и рис. 21 представлено сравнение экспериментально наблюдаемых и рассчитанных траекторий движения людей при 50 секундах, ширине входа 1,6 м, свободном выборе выхода. Как показано на рисунке 14 (а) и рисунке 20, в ходе эксперимента агенты разделились на отдельные полосы и сохраняли это разделение на протяжении всего эксперимента. Агенты выходили только через дверь коридора со стороны своей полосы. В Pathfinder полосы формируются, но они динамичны, и агенты выходят через обе двери коридора.

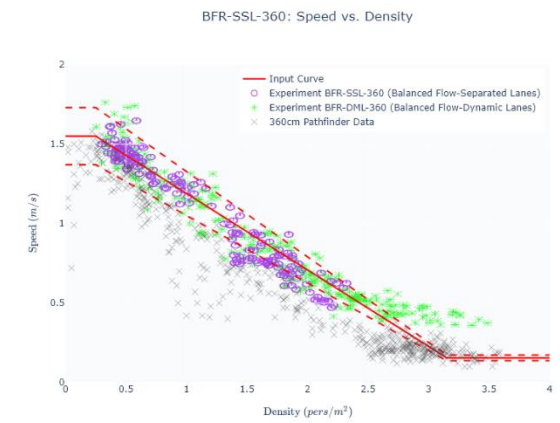


Рисунок 18. Результаты распределения скорости-плотности при свободном выборе места назначения, входных данных скорости-плотности для однонаправленного потока и равномерного распределения скорости 1,55+-0,18 м/с

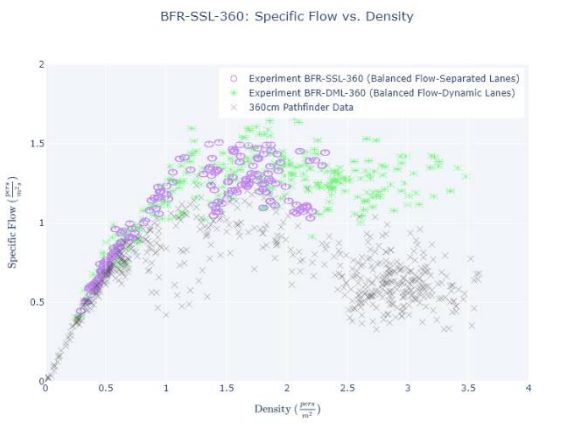


Рисунок 19. Результаты удельного расхода- при свободном выборе места назначения, , входных данных скорости-плотности для однонаправленного потока и равномерном распределении скорости 1,55+-0,18 м/с.

Рисунок 20. Экспериментальное изображение BFR-DDL-360-160-160

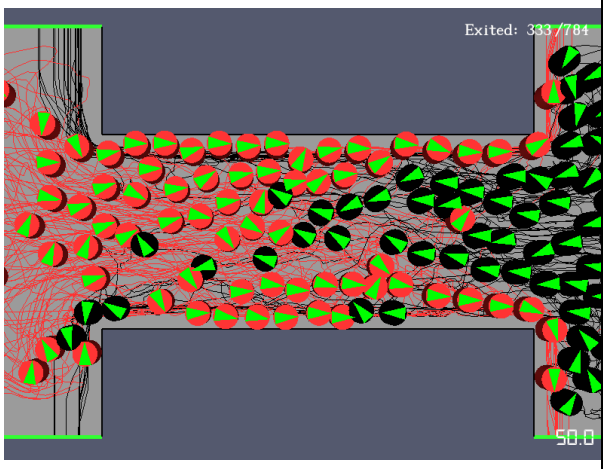


Рисунок 21. Pathfinder показывает пути движения агентов

2.2.4. Результаты для сбалансированного соотношения потоков (BFR) и назначенных выходов Динамический многополосный (DML)

Результаты по плотности-скорости и удельной плотности потока представлены для каждого из трех случаев скорости движения на Рисунке 22 и Рисунке 23. На этих кривых данные представлены за временные интервалы, когда были достигнуты "устойчивые" условия. Серые точки представляют все рассчитанные пары "скорость-плотность" для всех коридоров, а черные точки - усредненные значения для каждого коридора.

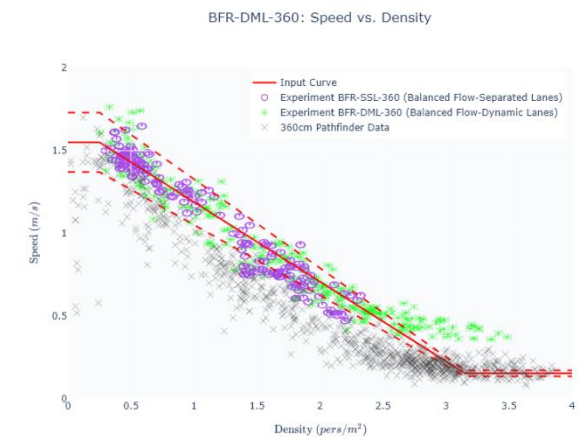


Рисунок 22. Результаты распределения скорости-плотности при назначенном выходе, входных данных скорости-плотности для однонаправленного потока и равномерного распределения скорости 1,55+-0,18 м/с

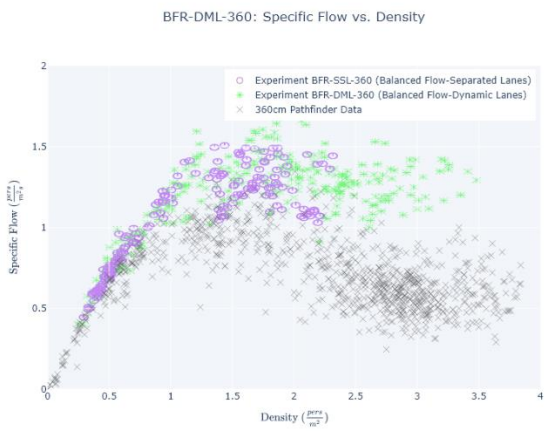


Рисунок 23. Результаты удельного расхода- при назначенном выходе, входных данных скорости-плотности для однонаправленного потока и равномерном распределении скорости 1,55+-0,18 м/с.

Рисунок 24. Экспериментальное изображение BFR-DML-360-160-160

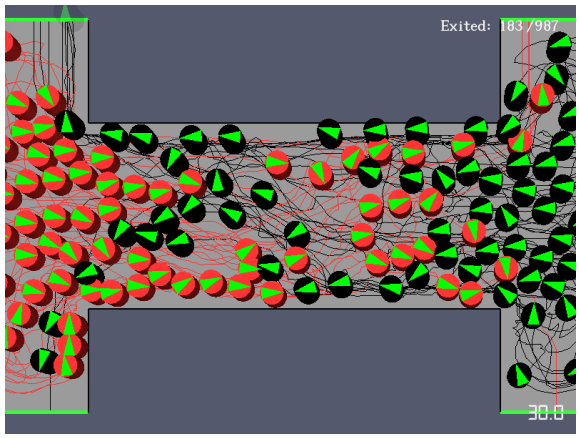


Рисунок 25. Pathfinder показывает пути движения агентов

На Рисунке 24 и Рисунке 25 представлено сравнение экспериментальных результатов и результатов Pathfinder при 30 секундах, ширине входа 1,6 м, назначенном месте назначения.

2.2.5. Анализ

Pathfinder включает в себя только простой алгоритм формирования полосы движения, поэтому он не воспроизводит упорядоченные траектории, показанные на рис. 14. Вместо этого агенты чаще пересекают траектории. В результате для заданной скорости расчетная зависимость скорости от плотности движения и удельный расход оказываются ниже экспериментальных данных. При высокой плотности людей оба показателя могут быть снижены в два и более раз.

Мы можем изучить этот вопрос подробнее, рассмотрев время прохождения всех агентов через коридор. В таблице 1 показано время пребывания в коридоре, рассчитанное путем вычитания времени входа первого посетителя в коридор из времени выхода последнего посетителя из коридора. Как можно видеть, при низкой плотности результаты Pathfinder

схожи с экспериментальными. Однако при высокой плотности время пребывания в Pathfinder значительно увеличивается.

Это можно считать консервативным, неоптимальным результатом.

Таблица 1. Сравнение времени нахождения агентов в коридоре в экспериментальном варианте и в варианте Pathfinder. Экспериментальные texp и Pathfinder tpath. При увеличении плотности движение противотока в Pathfinder замедляется сильнее, чем наблюдается в эксперименте.

Случай	texp	tpath	tpath/texp
BFR-SSL Сбалансированное соотношение потоков - стабильные раздельные полосы движения			
50 см	57 s	68.95 s	1.21
75 см	67.1 s	75.7 s	1.13
90 см	61.7 s	111.05 s	1.8
120 см	78 s	204.78 s	2.63
160 см	77.2 s	178.78 s	2.32
BFR-DML Сбалансированное соотношение потоков - динамическая многополосная дорога			
50 см	66.7 s	78.65 s	1.18
75 см	50.5 s	65.28 s	1.29
90 см	63.1 s	114.75 s	1.82
120 см	80 s	186.45 s	2.33
160 см	76.5 s	161.6 s	2.11
200 см	73.9 s	206.97 s	2.8
250 см	72.2 s	204.47 s	2.83

2.3. Фундаментальная диаграмма для слияния пешеходных потоков на Т-перекрестке

2.3.1. Введение

Была проведена серия экспериментов по измерению фундаментальной диаграммы поворота и слияния пешеходных потоков на Т-образном перекрестке (Zhang et al. 2011) Рисунок 26. Ширина коридора составляла 2,4 м, а плотность потока регулировалась с помощью различной ширины входа (от 0,5 м до 2,4 м), который находится на расстоянии 4 м от коридора. Сводка результатов для однонаправленных и двунаправленных потоков показана на рисунке 28.

В экспериментах Zhang et al. скорость агентов составляла 1,55± 0,18 м/с. Как видно, фундаментальные диаграммы перед Т-образным перекрестком отличаются от диаграмм за перекрестком. Авторы утверждают: "Однако мы не можем сделать вывод, приводит ли к различиям само поведение слияния или вызванные им заторы".

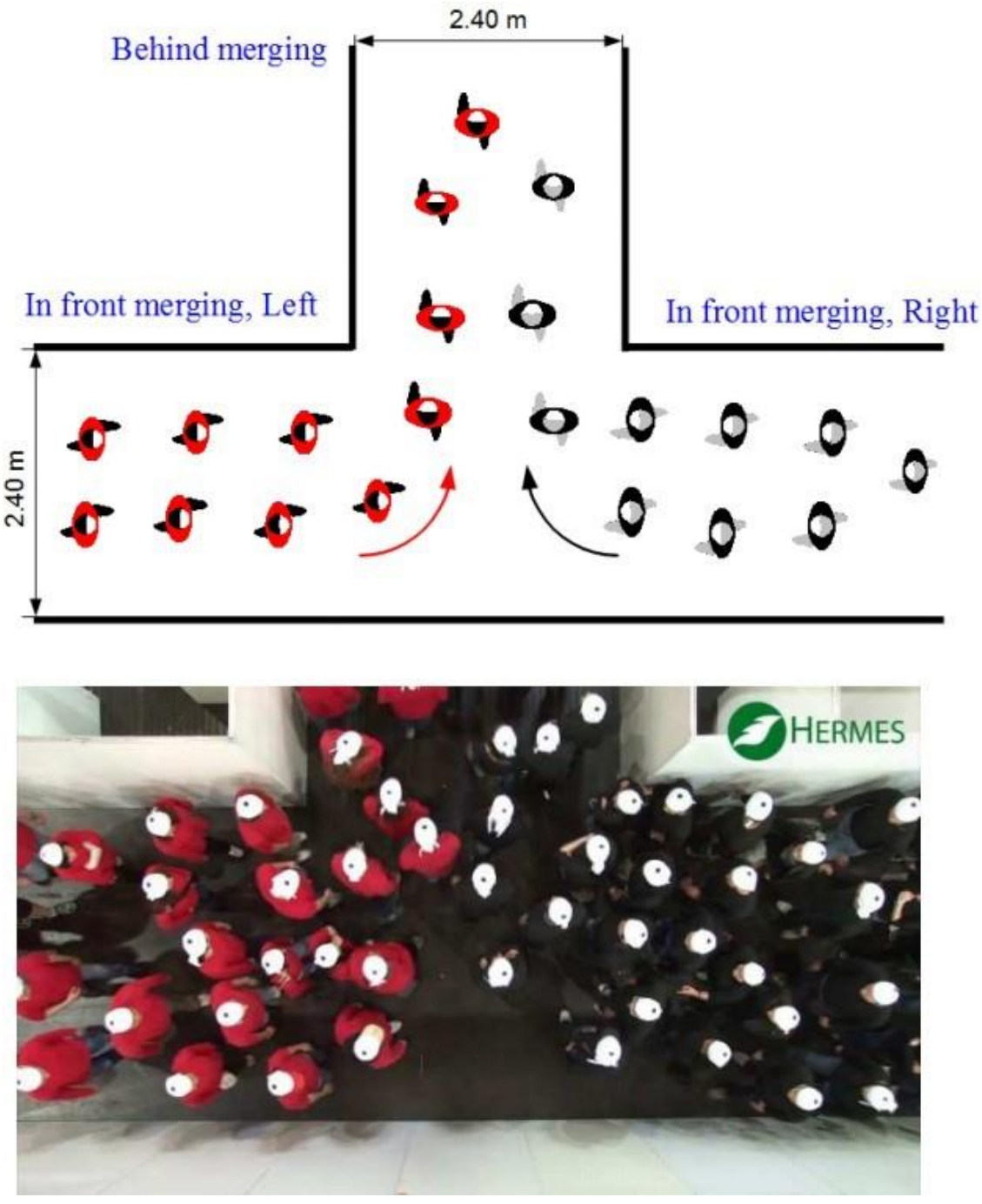


Рисунок 26. Эскиз эксперимента с Т-образным перекрестком и изображение Zhang and Seyfried 2013.

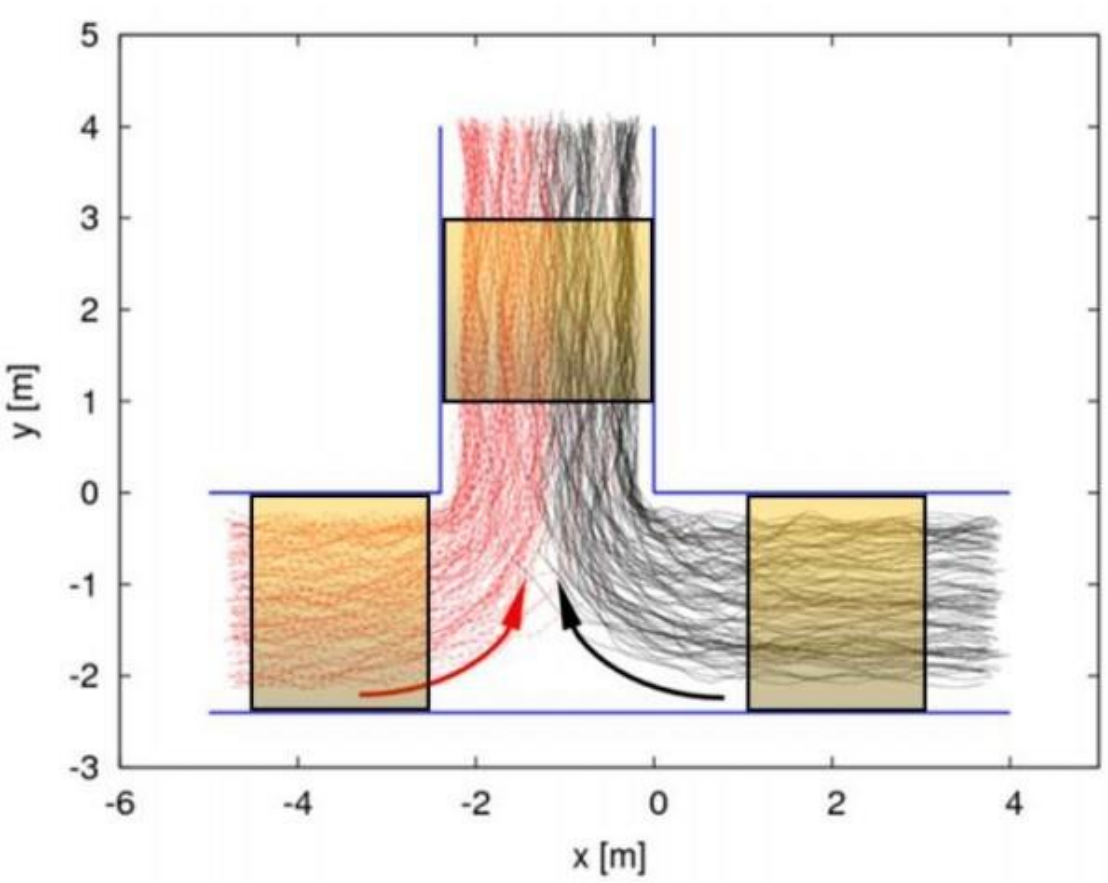


Рисунок 27. Pathfinder, показывающий пути движения людей и места, используемые для расчета плотности.

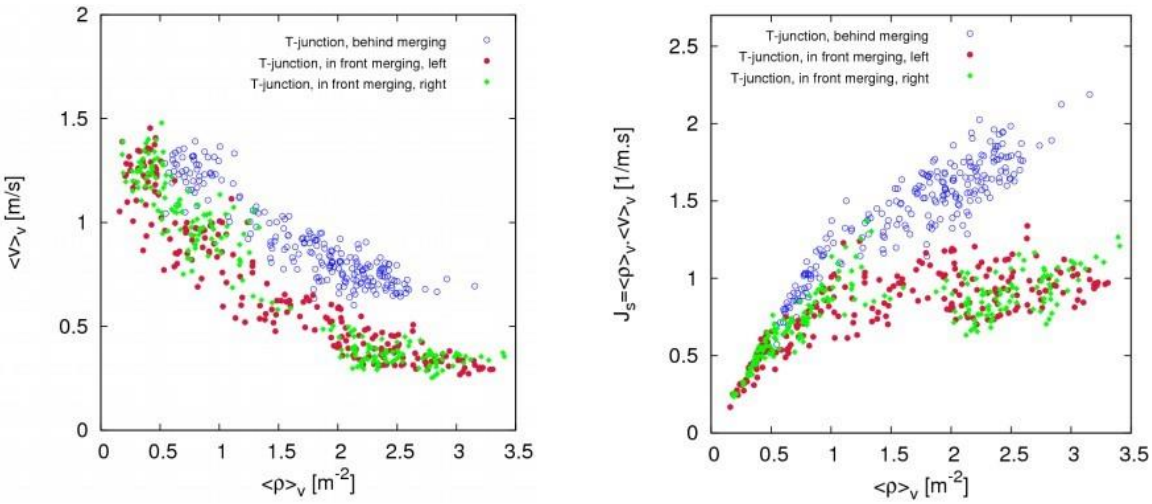


Рисунок 28. Фундаментальные диаграммы для T-перекрестка Zhang и Sey fried 2013.

2.3.2. Примечания по настройке

Соответствующая модель Pathfinder показана на рисунке 29. В документе не указаны точные значения ширины входа в коридор 2,4 м, поэтому в расчете Pathfinder были приняты пять случаев, когда ширина входа составляла 0,5 м, 1,0 м, 1,5 м, 2,0 м, 2,4 м.

В пяти случаях использовались значения Zhang и Seyfried 1,55± 0,18 м/с с профилем скорости, соответствующим данным по плотности-скорости, показанным на рисунке 3. Эта

входная кривая показана на рисунке 6. Таким образом, мы использовали ту же кривую плотности скорости в наших расчетах, как было определено на основе независимых экспериментов с однонаправленным потоком. Мы не пытались скорректировать кривую зависимости скорости от плотности для расчетов Т-образного перекрестка. Эта кривая приводит к максимальному удельному расходу 1,45 чел/с*м, плотности 1,736 чел/м2 и скорости 0,835 м/с.

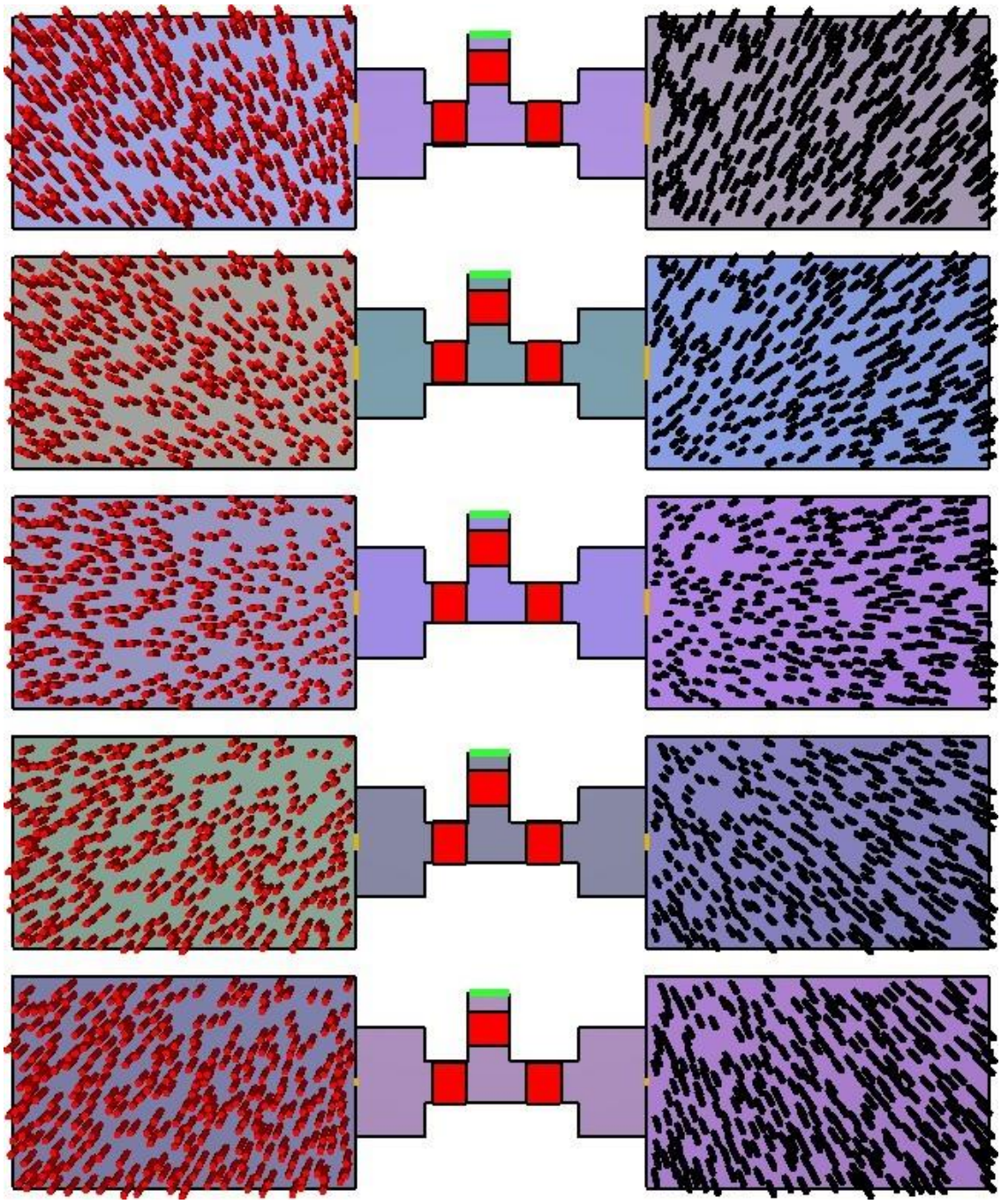


Рисунок 29. Модель траектории для экспериментов Zhang et al. с Т-образным перекрестком

2.3.3. Результаты

Результаты измерения плотности-скорости и удельного расхода представлены на Рисунке 30 и Рисунке 31. Данные представлены за временные интервалы, когда были достигнуты "устойчивые" условия. Расчетные точки для фронтальных измерений, как правило, лежат

либо в области низких плотностей (0,0-0,5 пер/м2), либо в области более высоких плотностей (2-3 чел/м2). Причина в том, что при небольших размерах входа (0,5 м и 1,0 м ширина входных дверей) очереди не образуются, поэтому плотность остается низкой. Однако при больших размерах входов (от 1,5 до 2,4 м) поток посетителей больше, чем может быть обеспечена шириной выхода, поэтому образуются очереди. Очереди вызывают повышенную плотность.

Как уже говорилось ранее, заданный профиль скорости и плотности был основан на экспериментах с однонаправленным потоком. Как можно видеть, данные сзади (и большинство данных впереди) лежат на указанной кривой.

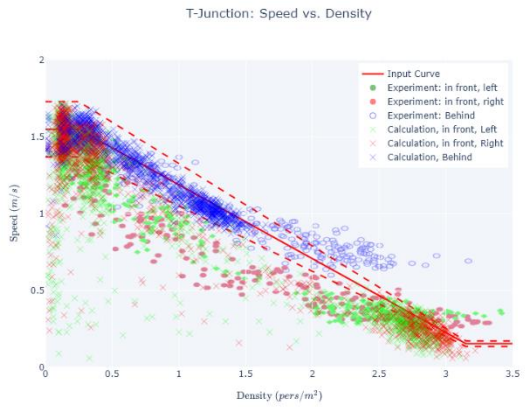


Рисунок 30. Результаты измерения скорости-плотности, для измеренной входной скорости-плотности и равномерном распределение скоростей 1,55± 0,18

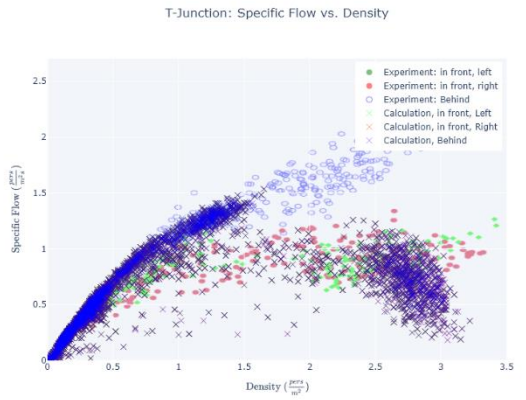


Рисунок 31. Результаты измерения удельного расхода, для измеренной входной скорости-плотности и равномерном распределение скоростей 1,55± 0,18

2.3.4. Анализ

Расчеты Pathfinder воспроизводят кривую "скорость-плотность". В экспериментах измеренные данные "позади" были аналогичны однонаправленным экспериментальным данным. Однако данные "впереди" имели более низкую скорость при заданной плотности. Результаты Pathfinder демонстрируют тот же эффект. Вероятно, это связано со слиянием и поворотами при слиянии потоков.

В целом, результаты Pathfinder удовлетворительно согласуются с экспериментальными данными. Важно помнить, что мы использовали зависимость скорости от плотности, основанную на однонаправленных данных. Мы не изменяли кривую для лучшего соответствия экспериментальным результатам, поэтому Pathfinder фиксирует измеренные различия между данными "позади" и "впереди".

2.4. Настройка фундаментальной диаграммы для лестниц и пандусов

2.4.1. Введение

Pathfinder позволяет пользователю определять индивидуальные фундаментальные диаграммы для движения вверх и вниз по лестницам и пандусам. Они задаются в профилях, так что в каждом профиле может быть пять фундаментальных диаграмм (горизонтальный путь, лестница вверх, лестница вниз, пандус вверх, пандус вниз) с различными номинальными скоростями для каждого случая (включая возможность

различных распределений). Несмотря на потенциальную сложность, это обеспечивают необходимую гибкость для соблюдения норм расчета эвакуации, требуемых в некоторых юрисдикциях.

В этом примере проверки мы будем использовать один профиль и определим пять различных фундаментальных диаграмм. Фундаментальные диаграммы будут соответствовать профилям мобильности российского эвакуационного кода (M1-M4), показанным на рисунке 32. По российским стандартам существует 4 типа человека:

M1 - здоровый человек

M2 - пожилой человек, или слепой, или другой инвалид

M3 - человек с костылями

M4 - человек в инвалидном кресле

Скорость зависит от плотности агентов:

$$D < D_0, V_D = V_0$$

$$D > D_0, V_D = V_0 \left(1 - a \ln\left(\frac{D}{D_0}\right)\right)$$

Где:

VD - скорость движения человека.

V0 - это максимальная скорость. Люди движутся с V0, если на них никто не влияет.

D - плотность людей (м2/м2) или доля занимаемой площади.

$$D = \frac{Nf}{S}$$

Где:

N - количество людей в области

f - площадь, занимаемая человеком, м2

S - площадь, м2

Type of person	f (m^2)	Parameter	Type of path				
			Room	Stair down	Stair up	Ramp down	Ramp up
M1	0.1 or 0.125	V_0 (m/min)	100	100	60	115	80
		D_0 (m^2/m^2)	0.051	0.089	0.067	0.171	0.107
		a	0.295	0.4	0.305	0.399	0.399
M2	0.2	V_0 (m/min)	30	30	20	45	25
		D_0 (m^2/m^2)	0.135	0.139	0.126	0.171	0.146
		a	0.335	0.346	0.348	0.438	0.384
M3	0.3	V_0 (m/min)	70	20	25	105	55
		D_0 (m^2/m^2)	0.102	0.208	0.12	0.122	0.136
		a	0.35	0.454	0.347	0.416	0.446
M4	0.96	V_0 (m/min)	60	—	—	115	40
		D_0 (m^2/m^2)	0.135	—	—	0.146	0.15
		a	0.4	—	—	0.424	0.42

Рисунок 32. Параметры зависимости скорости от плотности

Для здорового населения M1 рассчитанные фундаментальные диаграммы показаны на рисунке 33.

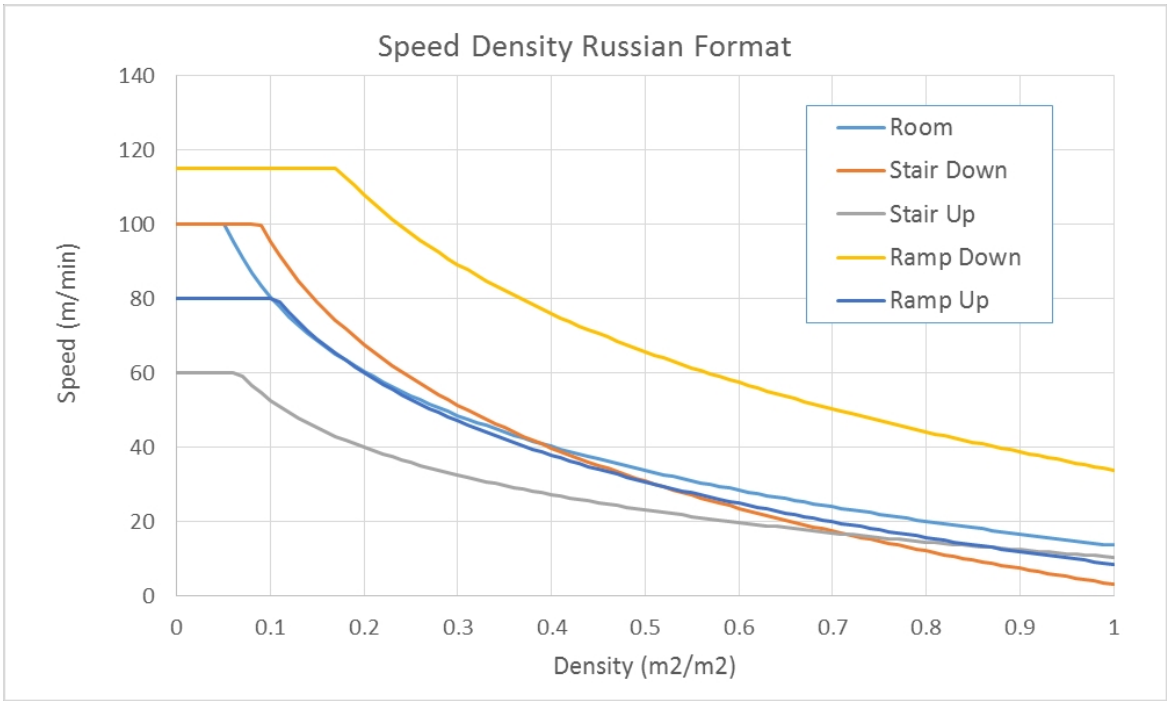


Рисунок 33. Фундаментальные диаграммы для здорового населения

2.4.2. Примечания по настройке

Модели Pathfinder использовались для моделирования эвакуации для здоровых людей с площадью 0,1 м2 для каждого человека. Было использовано пять моделей, соответствующих ходьбе по плоскости, подъему по лестнице, спуску по лестнице, подъему

по пандусу, спуску по пандусу. Поскольку мы не воспроизводим конкретный набор экспериментов, мы использовали источники агентов для поступления агентов в модель.

Модель для плоскости показана на рисунке 35, источниками являются помещения слева, а выход - справа. Источники вводят агентов в модель, красные квадраты указывают на места измерения скорости-плотности, а агенты выходят справа. Для управления плотностью были заданы скорость источника во входной комнате и скорость потока в выходных дверях, как показано на рисунке 34.

Для разных случаев значения различны, так как кривые "скорость-плотность" различны и могут поддерживаться разные скорости потока. Аналогичные модели были использованы для лестниц и пандусов.

Source and Exit Flow Rates (pers/s)									
Level		Stair Down		Stair Up		Ramp Down		Ramp Up	
Source Flow	Hall Exit Rate	Source Flow	Stair Exit Rate	Source Flow	Stair Exit Rate	Source Flow	Ramp Exit Rate	Source Flow	Ramp Exit Rate
3.00	6.00	3.00	6.00	1.00	6.00	4.00	Open	3.00	6.00
4.00	6.00	4.00	6.00	3.00	6.00	8.00	Open	4.00	6.00
5.00	6.00	5.00	6.00	4.00	6.00	12.00	Open	5.00	6.00
6.00	6.00	6.00	6.00	5.00	6.00	16.00	Open	6.00	6.00
6.25	6.00	6.50	6.00	6.00	6.00	20.00	Open	6.50	6.00
6.50	6.00	7.00	6.00	6.50	6.00	24.00	Open	7.00	6.00
6.75	6.00	7.50	6.00	7.00	6.00	28.00	Open	7.50	6.00
7.00	6.00	8.00	6.00	7.50	6.00	32.00	Open	8.00	6.00

Рисунок 34. Скорость потока в источниках и выходах

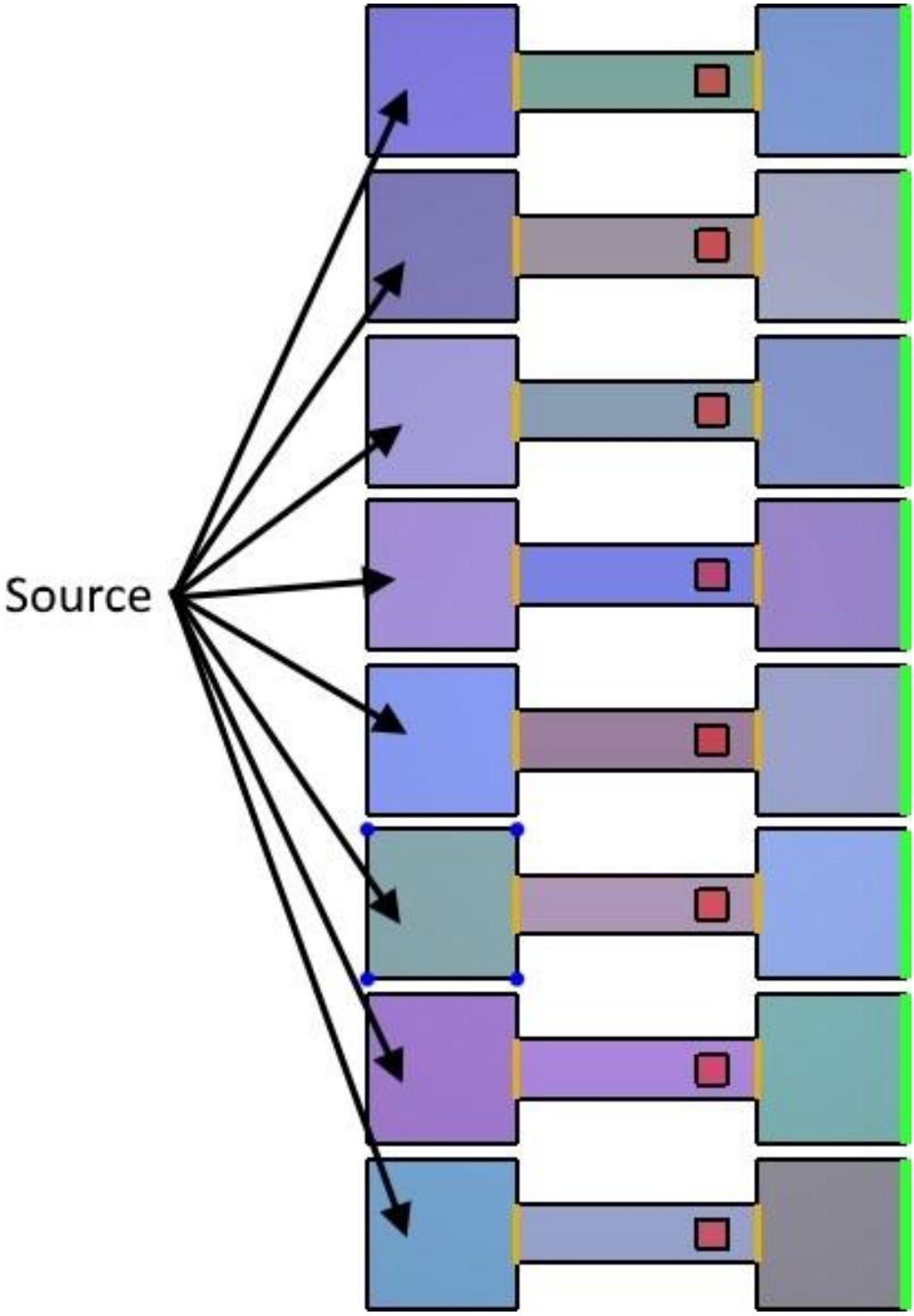


Рисунок 35. Модель Pathfinder для определяемой пользователем фундаментальной диаграммы. В данном случае речь идет о движении по плоскости.

Входные данные для Pathfinder состоят из скорости (или отношения скоростей) для каждого случая и нормализованной кривой "скорость-плотность", Рисунок 36.

Кроме того, необходимо установить размер людей в соответствии с плотностью населения, определенной стандартом.

Зная плотность, мы можем предположить плотную гексагональную упаковку следующим образом:

$$\rho_{HEX} = \frac{2}{\left(\left(\sqrt{3}\right)S^2\right)}$$

or:

$$S = \sqrt{\frac{2}{\left(\left(\sqrt{3}\right)\rho_{HEX}\right)}}$$

Где:

S - расстояние между центрами шестигранных кругов. Для плотности 10 перс/м2 расстояние между центрами составляет 34 см.

Кроме того, необходимо установить соответствующее комфортное расстояние на ноль.

Output Data for Input to Pathfinder

This data is formatted so that you can copy it and paste into the Pathfinder Speed-Density table.

Density units are persons/m2, speed-density curve is normalized, speed fraction is specified for stairs and ramps.

Max Speeds (m/s)		Speed Fraction		Hex Pack Distance		
Room =	1.667	Room =	N/A	Distance =	0.340 m	(Shoulder Width in Pathfinder, set Comfort Distance = 0)
Stair Down =	1.667	Stair Down =	1.000			
Stair Up =	1.000	Stair Up =	0.600			
Ramp Down =	1.917	Ramp Down =	1.150			
Ramp Up =	1.333	Ramp Up =	0.800			

Room		Stair Down		Stair Up		Ramp Down		Ramp Up	
Density (p/m2)	Fraction of Max	Density (p/m2)	Fraction of Max	Density (p/m2)	Fraction of Max	Density (p/m2)	Fraction of Max	Density (p/m2)	Fraction of Max
0.000	1.000	0.000	1.000	0.000	1.000	0.000	1.000	0.000	1.000
0.500	1.000	0.500	1.000	0.500	1.000	0.500	1.000	0.500	1.000
1.000	0.805	1.000	0.953	1.000	0.878	1.000	1.000	1.000	1.000
1.500	0.687	1.500	0.791	1.500	0.754	1.500	1.000	1.500	0.865
2.000	0.604	2.000	0.676	2.000	0.666	2.000	0.937	2.000	0.750
2.500	0.539	2.500	0.587	2.500	0.598	2.500	0.848	2.500	0.661
3.000	0.486	3.000	0.514	3.000	0.543	3.000	0.776	3.000	0.589
3.500	0.441	3.500	0.452	3.500	0.496	3.500	0.714	3.500	0.527
4.000	0.403	4.000	0.399	4.000	0.455	4.000	0.661	4.000	0.474
4.500	0.369	4.500	0.352	4.500	0.419	4.500	0.614	4.500	0.427
5.000	0.338	5.000	0.310	5.000	0.387	5.000	0.572	5.000	0.385
5.500	0.310	5.500	0.271	5.500	0.358	5.500	0.534	5.500	0.347
6.000	0.285	6.000	0.237	6.000	0.331	6.000	0.499	6.000	0.312
6.500	0.262	6.500	0.205	6.500	0.307	6.500	0.467	6.500	0.280
7.000	0.240	7.000	0.175	7.000	0.284	7.000	0.438	7.000	0.251
7.500	0.220	7.500	0.147	7.500	0.263	7.500	0.410	7.500	0.223
8.000	0.202	8.000	0.122	8.000	0.244	8.000	0.384	8.000	0.197
8.500	0.184	8.500	0.097	8.500	0.225	8.500	0.360	8.500	0.173
9.000	0.168	9.000	0.074	9.000	0.208	9.000	0.337	9.000	0.150
9.500	0.152	9.500	0.053	9.500	0.191	9.500	0.316	9.500	0.129
10.000	0.137	10.000	0.032	10.000	0.176	10.000	0.295	10.000	0.108

Рисунок 36. Фундаментальные кривые, использованные в данной верификационной задаче

2.4.3. Результаты

Результаты плотности-скоростей представлены для каждого из пяти типов пути (горизонтальный путь, лестница вверх, лестница вниз, пандус вверх, пандус вниз). На этих кривых данные представлены за временные интервалы, когда были достигнуты "устойчивые" условия. Серые точки представляют собой все рассчитанные пары "скорость-плотность" для всех коридоров, а черные точки - усредненные значения для каждого коридора.

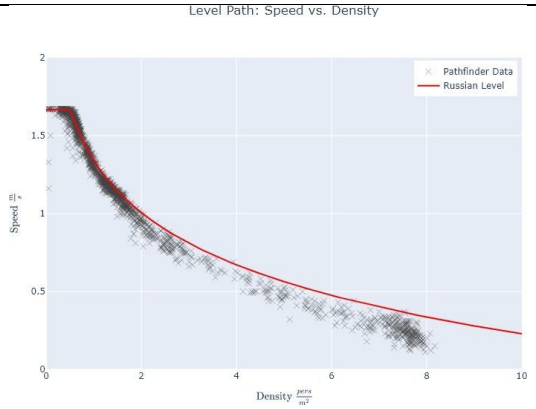


Рисунок 37. Результаты плотности скоростей для моделирования российской эвакуации, горизонтальный путь.

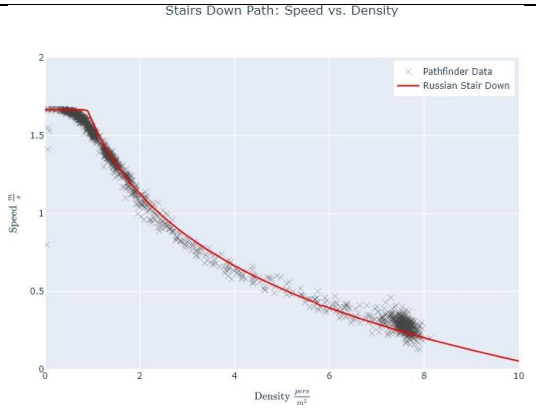


Рисунок 38. Результаты плотности скоростей для моделирования российской эвакуации, лестница вниз.

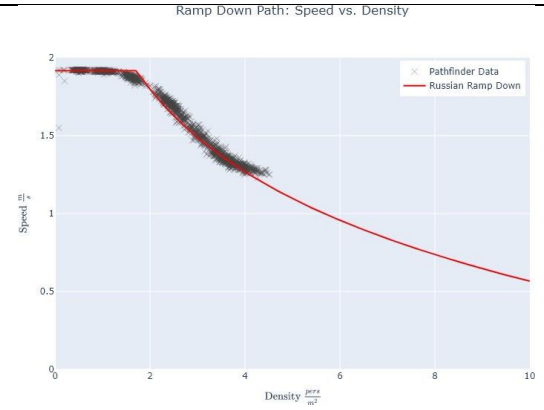


Рисунок 39. Результаты плотности скоростей для моделирования российской эвакуации, лестница вверх.

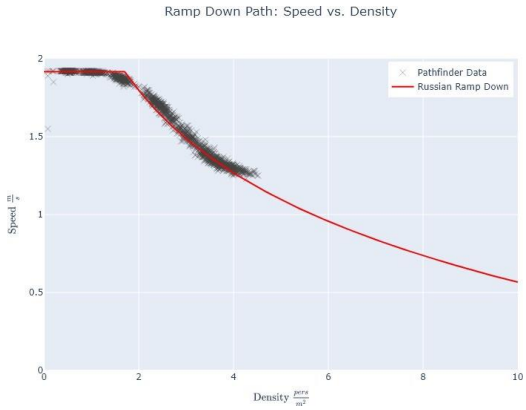


Рисунок 40. Результаты плотности распределения скорости для моделирования эвакуации в России, пандус вниз

Примечание

Скорость спуска людей по пандусу настолько велика, что невозможно обеспечить подачу людей из помещения подачи уровня со скоростью, обеспечивающей плотность пандуса более 4 чел/м2.

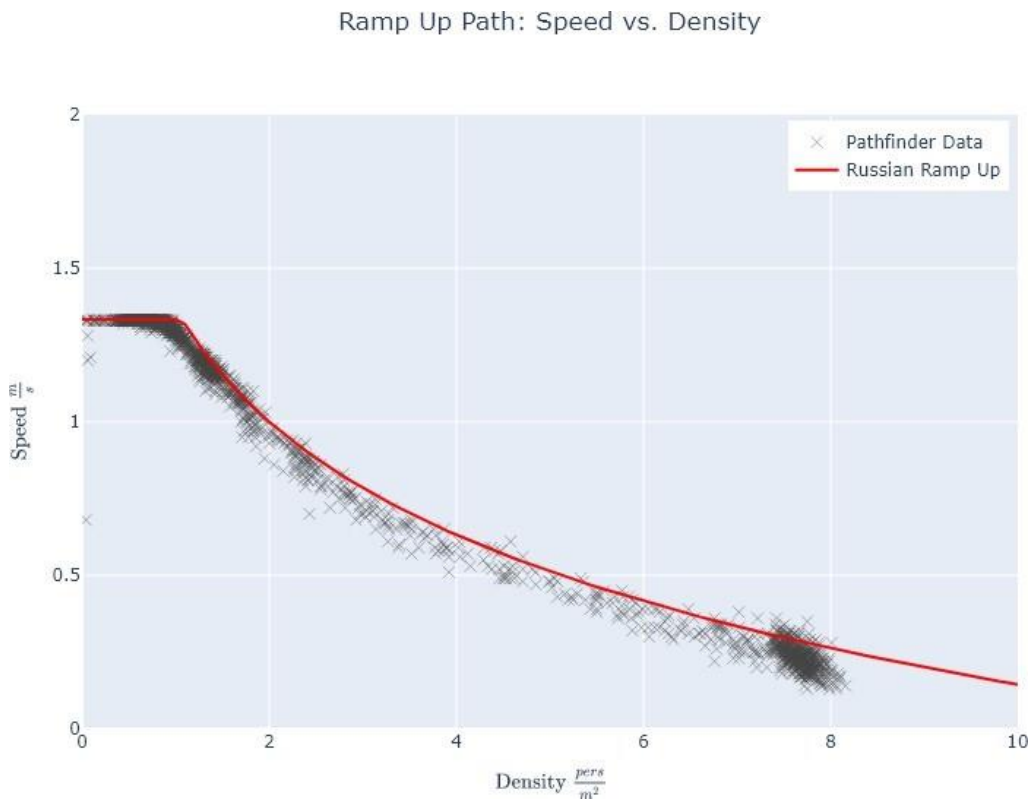


Рисунок 41. Результаты плотности скоростей для моделирования российской эвакуации, пандус вверх

2.4.4. Анализ

Эти результаты показывают, что Pathfinder правильно использует заданные кривые зависимости скорости от плотности движения для пяти различных типов путей (горизонтальный путь, лестница вверх, лестница вниз, пандус вверх, пандус вниз). Для случая спуска по пандусу, где удельные потоки намного выше, чем это возможно на ровном пространстве, алгоритм движения Pathfinder ограничил максимальную плотность примерно до 4 перс/м2.

ПРИМЕЧАНИЕ

4 перс/м2 - это больше, чем когда-либо допускалось в расчетах SFPE.

3. Испытания на скорость потока

3.1. Скорость потока через дверь

3.1.1. Введение

Этот тест проверяет расчет скорости потока в дверях Pathfinder. В режиме рулевого управления скорость потока в дверях не задается, а зависит от движения людей. SFPE рассчитывает скорость потока в дверях на основе максимального удельного расхода 1,316 чел/с*м. Для дверей заданный пограничный слой составляет 0,15 м, поэтому для двери шириной 1 м рассчитывается поток 0,92 чел/с.

3.1.2. Примечания по настройке

Соответствующая модель Pathfinder показана на рисунке 42. Ширина дверей варьируется от 0,7 м до 3,0 м, ширина входного коридора - 5 м. Были запущены два случая режима управляемого движения: один с постоянной скоростью 1,19 м/с, другой - с равномерным распределением скорости 1,19± 0,25 м/с. Кроме того, были проведены расчеты режима SFPE и режима Steering+ SFPE для равномерного распределения скорости 1,19± 0,25 м/с.

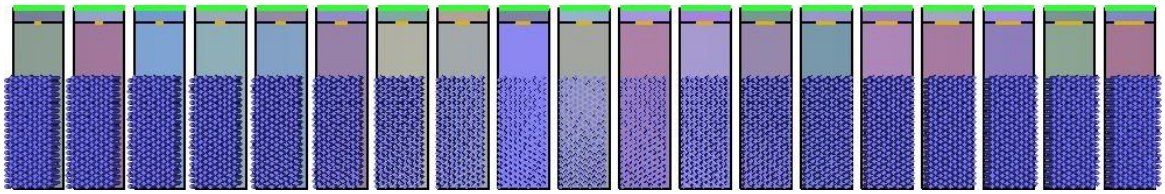


Рисунок 42. Модель Pathfinder, использованная для изучения скорости потока через дверь.

3.1.3. Результаты

Скорости потока через двери показаны на Рисунках 43 - 46. Эти данные были усреднены по периодам времени, когда различные двери достигали "устойчивого состояния" потока. Для сравнения, красные линии показывают скорость потока SFPE для ширины двери и границы 0,15 м.

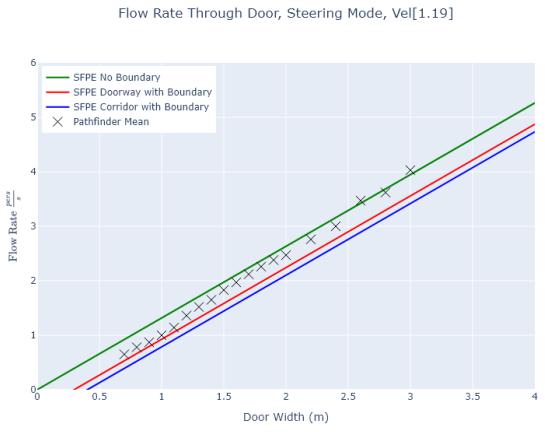


Рисунок 43 Поток через дверь для управляемого движения, агенты с максимальной скоростью 1,19 м/с

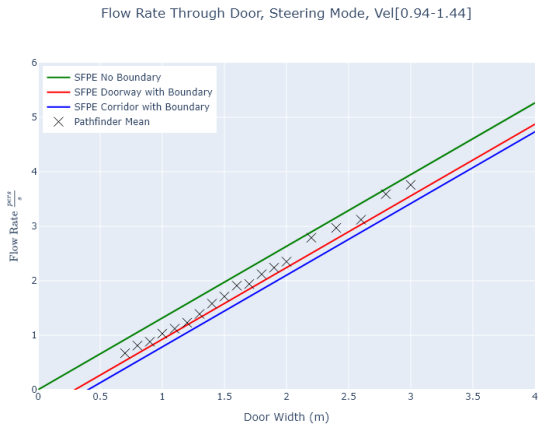


Рисунок 44 Поток через дверь для управляемого движения, агенты с распределением скорости 1,19+-0,25 м/с

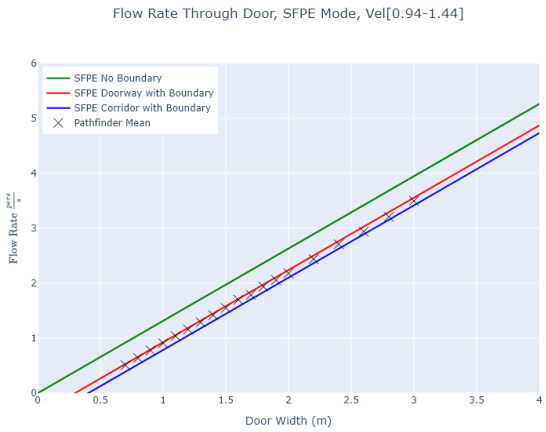


Рисунок 45 Поток через дверь для SFPE, агенты с распределением скорости 1,19+-0,25 м/с

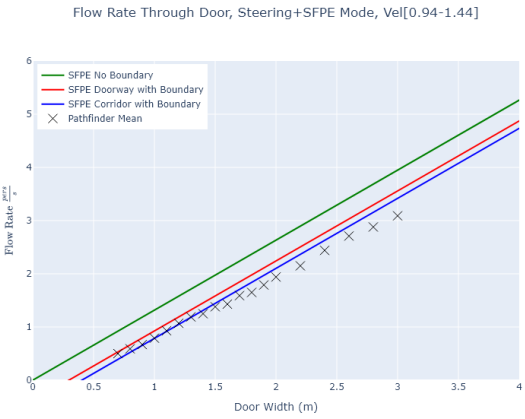


Рисунок 45 Поток через дверь для Steering+SFPE, агенты с распределением скорости 1,19+-0,25 м/с

3.1.4. Анализ

Расчеты в режиме управляемого движения дают несколько более высокие скорости потока через дверь, чем прогнозируемые с помощью расчетов SFPE. Результаты режима Pathfinder SFPE практически идентичны прогнозам SFPE. Результаты режима Steering+ SFPE несколько ниже, чем прогнозы SFPE.

Прогнозы удовлетворительные.

3.2. Скорость потока по лестнице

3.2.1. Введение

Этот тест проверяет расчет скорости движения по лестнице Pathfinder. В режиме рулевого управления скорость потока на лестнице не задается, а представляет собой возникающее поведение, основанное на движении людей, включая максимальную скорость в зависимости от размеров ступени/подъема лестницы и плотности людей. SFPE рассчитывает скорость потока на лестнице на основе максимального удельного потока, который является функцией размеров ступени/подъема, см. рис.47. Для лестниц заданный пограничный слой составляет 0,15 м, поэтому лестница шириной 1 м с подъемом/ступенью 178/279 будет иметь рассчитанный поток 0,71 чел/с.

Egress Component		F_s pers/sec-m of Effective Width (pers/min-ft of Effective Width)
Corridor, aisle, ramp, doorway		1.32 (24.0)
Stair Riser, mm (in.)	Stair Tread, mm (in.)	
190 (7.5)	254 (10)	0.94 (17.1)
178 (7.0)	279 (11)	1.01 (18.5)
165 (6.5)	305 (12)	1.09 (20.0)
165 (6.5)	330 (13)	1.16 (21.2)

Рисунок 47. Удельный расход для лестниц в зависимости от размеров ступени и проступи. (Таблица 8 в SFPE Engineering Guide to Human Behavior in Fire)

3.2.2. Примечания по настройке

Соответствующая модель Pathfinder показана на рисунке 48. Ширина дверей варьируется от 0,7 м до 3,0 м. Ширина входного коридора составляет 5 м. Лестница имеет общий подъем 7 м и пролет 11 м.

Были запущены два случая режима рулевого управления: один с постоянной скоростью 1,19 м/с, а другой с равномерным распределением скорости 1,19± 0,25 м/с. Кроме того, были проведены расчеты режима SFPE и режима Steering+SFPE для равномерного распределения скорости 1,19± 0,25 м/с.

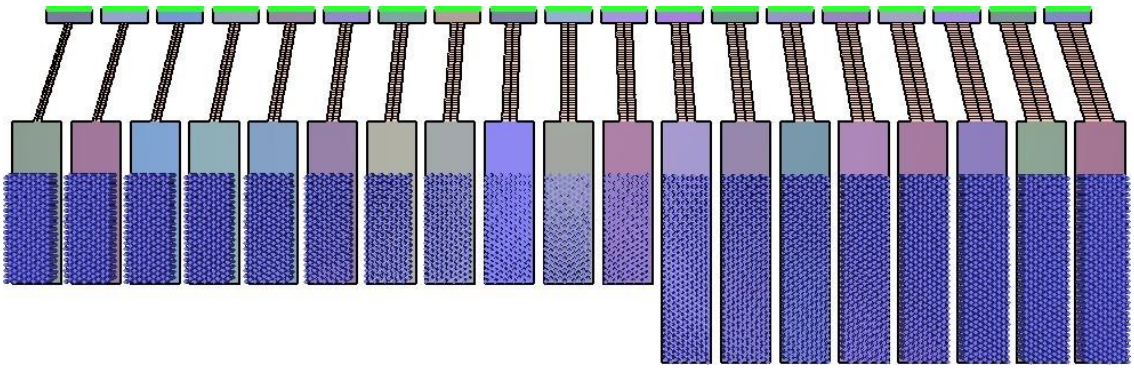


Рисунок 48. Модель Pathfinder, используемая для изучения скорости потока по лестнице.

3.2.3. Результаты

Расходы по лестницам показаны на рисунках 49 - 52. Эти данные были усреднены по периодам времени, когда различные лестницы достигали "устойчивого состояния" потока. Для сравнения, красные линии показывают скорость потока SFPE для ширины лестницы и граничного слоя 0,15 м.

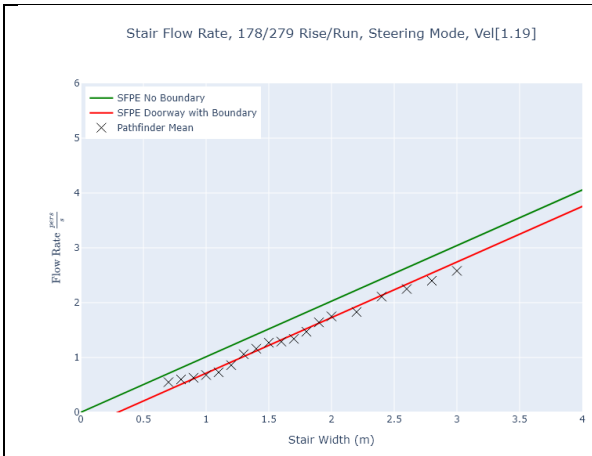


Рисунок 49 Поток на лестнице для управляемого движения, агенты с максимальной скоростью 1,19 м/с

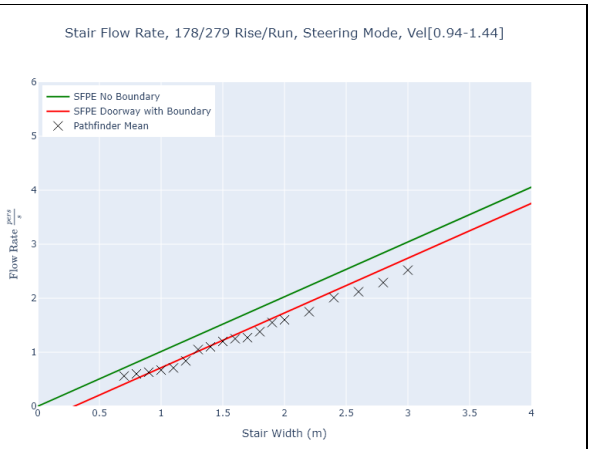


Рисунок 50 Поток на лестнице для управляемого движения, агенты с распределением скорости 1,19+-0,25 м/с

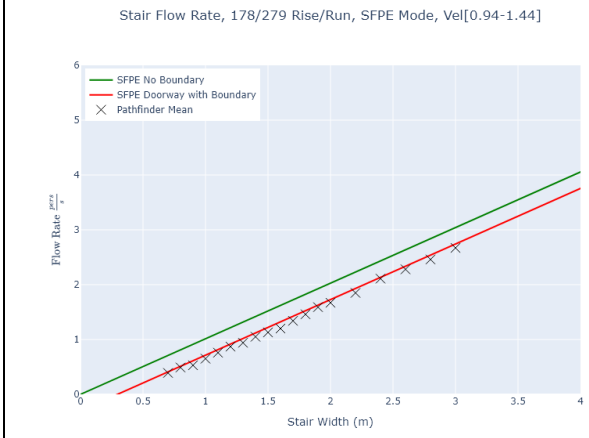


Рисунок 51 Поток на лестнице для SFPE, агенты с распределением скорости 1,19+-0,25 м/с

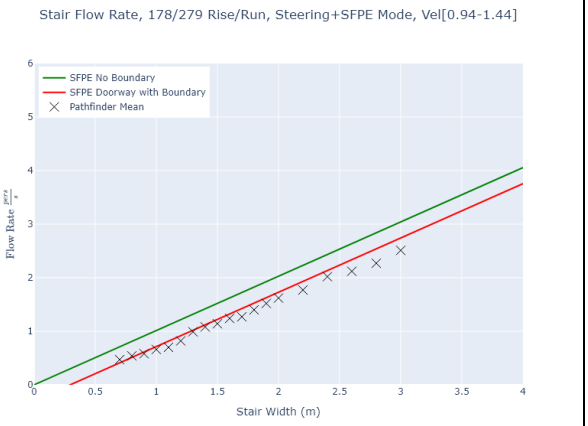


Рисунок 52 Поток на лестнице для Steering+SFPE, агенты с распределением скорости 1,19+-0,25 м/с

3.2.4. Анализ

Расчеты режима рулевого управления Pathfinder близки к расчетам SFPE. Результаты режима Pathfinder SFPE практически идентичны прогнозам SFPE. Результаты режима Steering+ SFPE несколько ниже, чем прогнозы SFPE.

Прогнозы удовлетворительные.

3.3. Скорость потока в коридоре

3.3.1. Введение

Этот тест похож на проверку скорости потока через дверь, но в нем исследуются скорости потока через коридоры, для которых SFPE представляет собой пограничный слой толщиной 0,2 м (коридор длиной 1 м имеет поток 0,79 перс/с). В нем также проверяется чувствительность Pathfinder к ширине обочины с каждой стороны коридора.

3.3.2. Примечания по настройке

Модели Pathfinder показаны на Рисунке 53 и Рисунке 54. Ширина коридоров составляет 1 м и 3 м, а ширина обочин - от 0 до 2 м. Были запущены режимы рулевого управления:

один с постоянной скоростью 1,19 м/с, другой - с равномерным распределением скорости 1,19± 0,25 м/с. Кроме того, были проведены расчеты режима SFPE и режима Steering+ SFPE для равномерного распределения скоростей 1,19 ± 0,25 м/с.

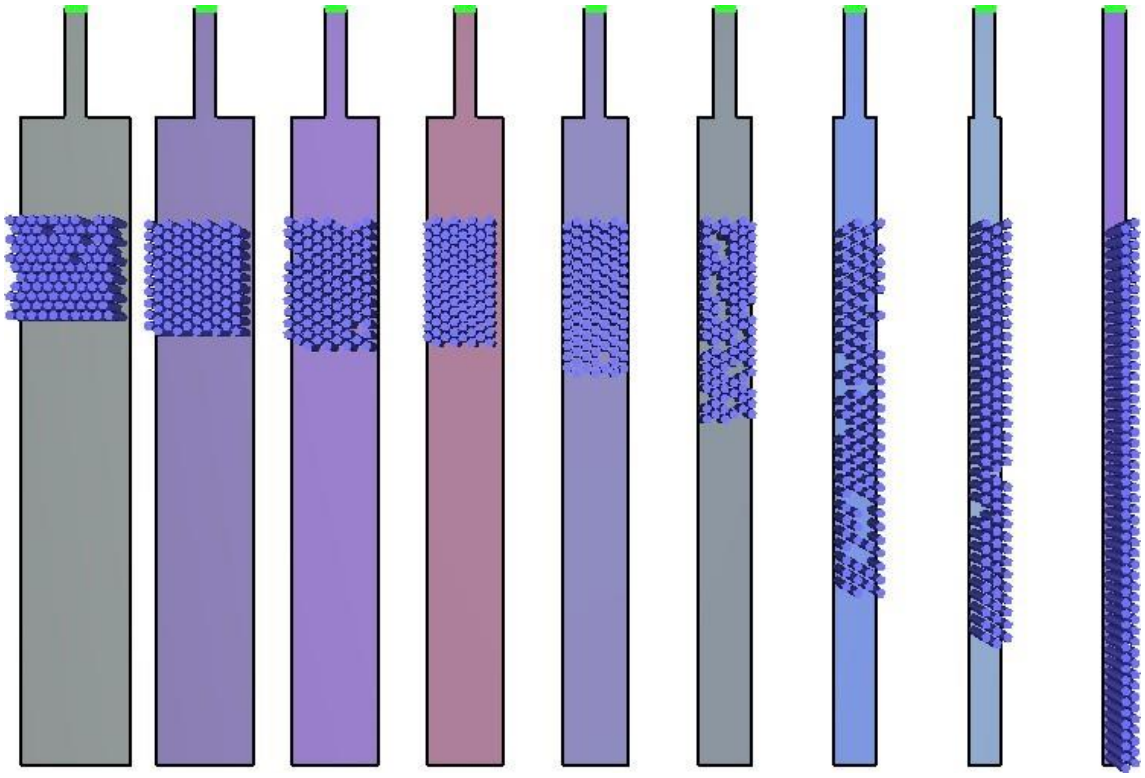


Рисунок 53. Модель Pathfinder, использованная для изучения скорости потока в коридоре шириной 1 м.

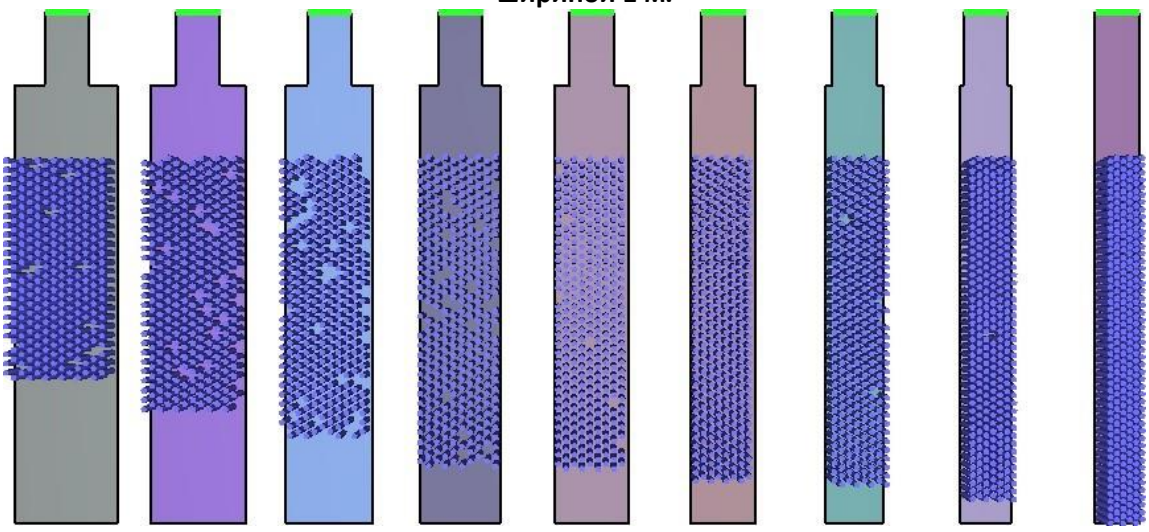


Рисунок 54. Модель Pathfinder, использованная для изучения скорости потока в коридоре шириной 3 м.

3.3.3. Результаты

Скорости потока в коридоре показаны на Рисунках 55 - 62. Эти данные были усреднены по периодам времени, когда различные двери достигали "устойчивого состояния" потока. Для сравнения, синие линии показывают скорость потока в коридоре SFPE.

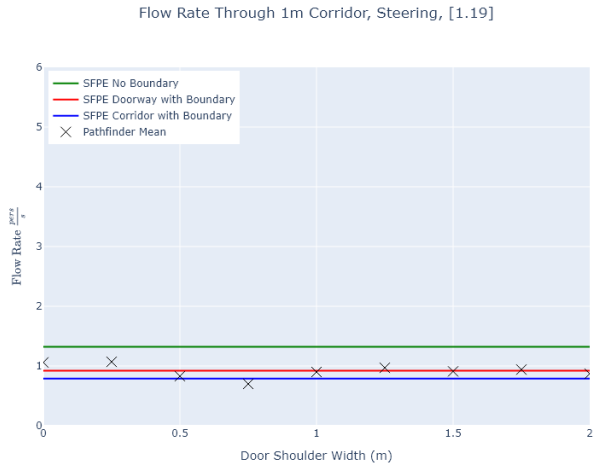


Рисунок 55 Поток в коридоре 1 м для управляемого движения, агенты с максимальной скоростью 1,19 м/с

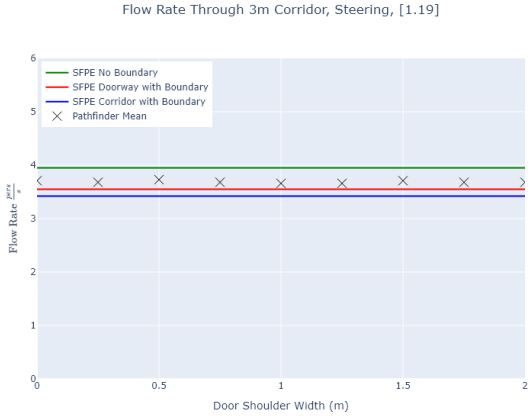


Рисунок 56 Поток в коридоре 3 м для управляемого движения, агенты с максимальной скоростью 1,19 м/с

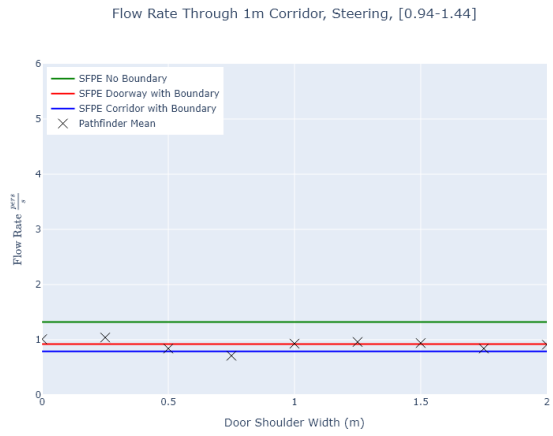


Рисунок 57 Поток в коридоре 1 м для м для управляемого движения, агенты с распределением скорости 1,19+-0,25 м/с

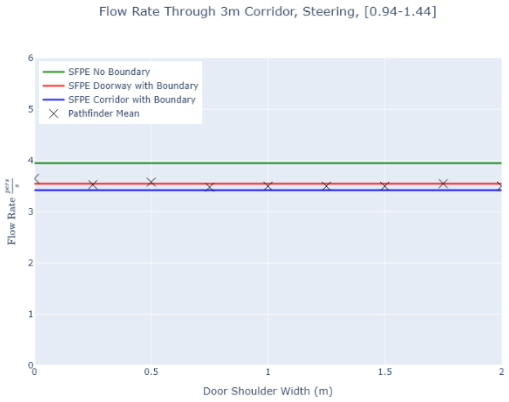


Рисунок 58 Поток в коридоре 3 м для м для управляемого движения, агенты с распределением скорости 1,19+-0,25 м/с

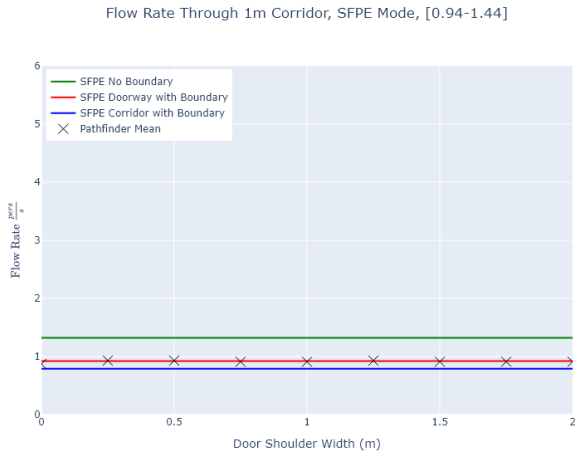


Рисунок 59 Поток в коридоре 1 м для SFPE, агенты с распределением скорости 1,19+-0,25 м/с

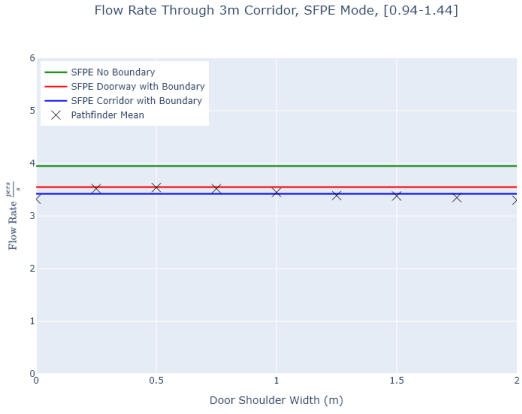


Рисунок 60 Поток в коридоре 3 м для SFPE, агенты с распределением скорости 1,19+-0,25 м/с

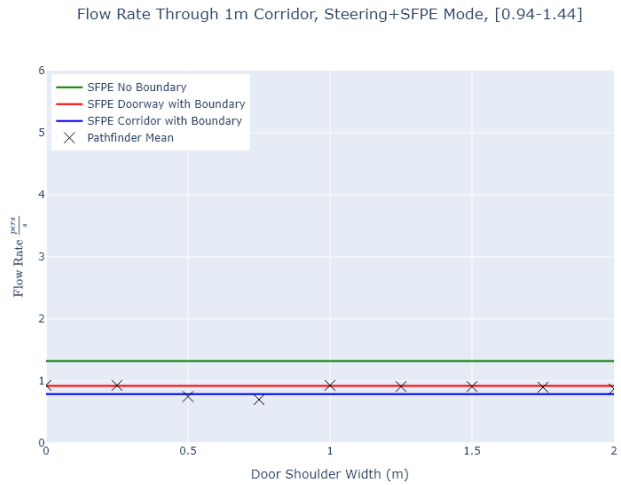


Рисунок 61 Поток в коридоре 1 м для м для Steering+SFPE, агенты с распределением скорости 1,19+-0,25 м/с

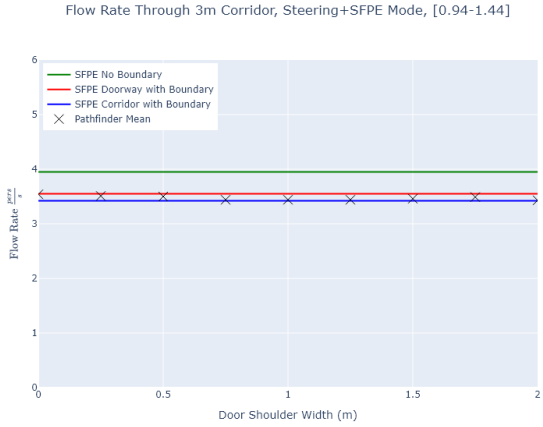


Рисунок 62 Поток в коридоре 3 м для м для Steering+SFPE, агенты с распределением скорости 1,19+-0,25 м/с

3.3.4. Анализ

Для коридора шириной 1 м расчеты Pathfinder дают несколько больший расход, чем расчеты SFPE. Для двери шириной 3 м скорости потока практически идентичны расчетам SFPE. Результаты не зависят от ширины бокового выступа перед входом.

В режиме SFPE ширина коридора не влияет на расчеты, поэтому скорость потока регулируется в основном скоростью потока через выходную дверь. Также в режиме SFPE, когда коридор имеет ту же ширину, что и входная комната, плотность в коридоре/входной комнате замедляет скорость ходьбы, поэтому в случаях коридора с нулевой шириной выступа скорость потока немного ниже.

Корреляция между расчетами Pathfinder и ожидаемыми расходами является удовлетворительной.

4. Поведенческие тесты

4.1. Зона безопасности как конечный пункт назначения

4.1.1. Введение

Здесь тестируются простые модели поведения, включая движения к выходам и зонам безопасности. 150 человек были равномерно разделены на три варианта поведения: пойти к одному из двух выходов или пойти в зону безопасности (конечный пункт назначения).

4.1.2. Примечания по настройке

Изначально люди находились в одной комнате, а затем направились к своим выходам, как показано на рисунке 63.

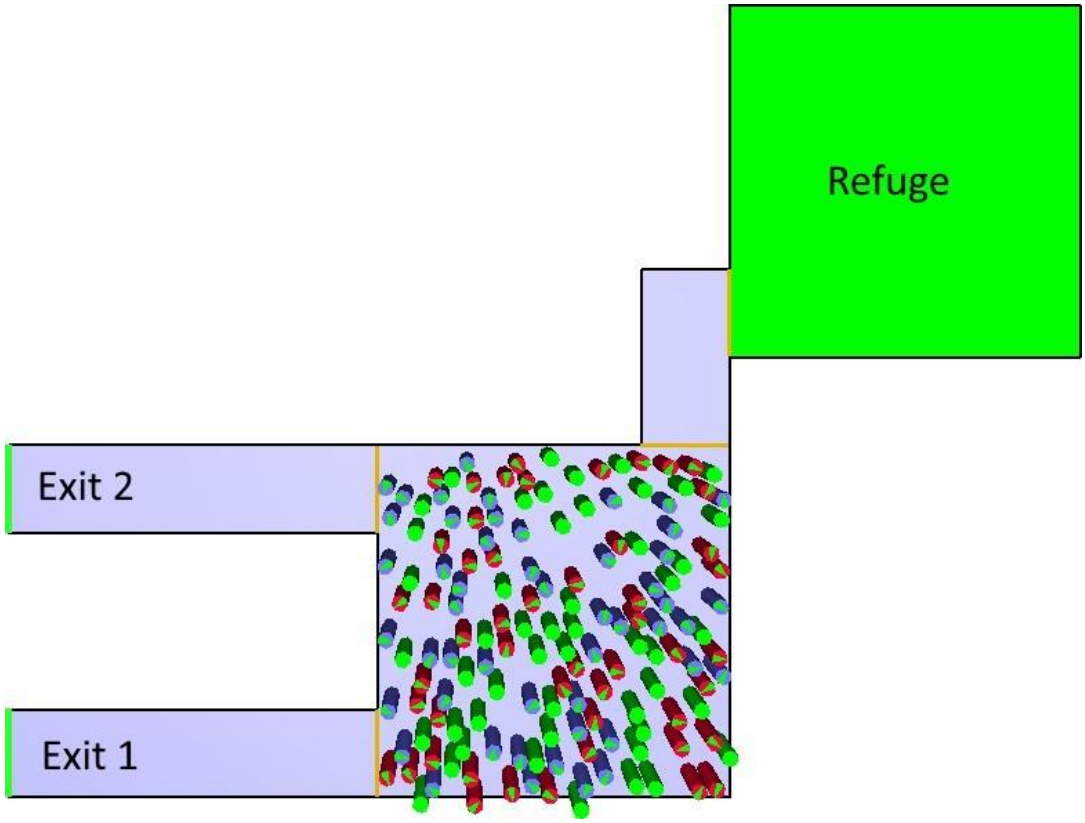


Рисунок 63. Модель, используемая для проверки поведения.

4.1.3. Результаты

На рисунке 64 показан график использования зоны безопасности. 50 человек, которым было назначено использовать зону безопасности, сделали это. Такие же результаты были получены для режимов SFPE и Steering+ SFPE.

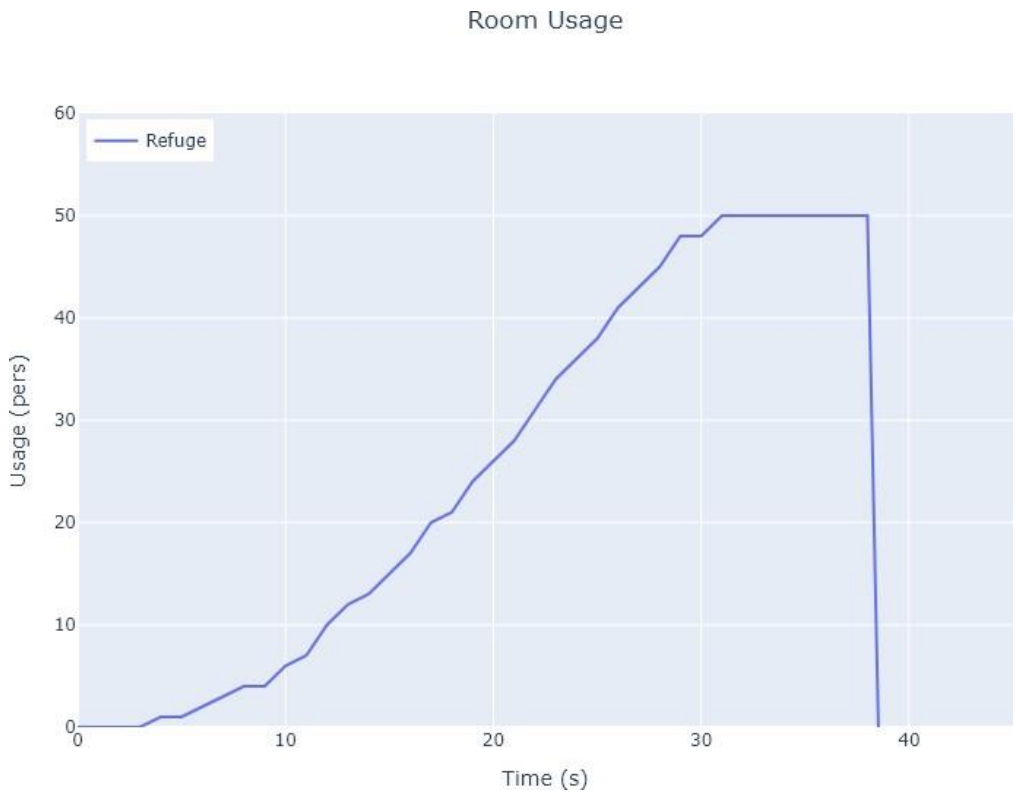


Рисунок 64. Население в зоне безопасности. Моделирование режима управляемого движения.

4.1.4. Анализ

Агенты использовали выходы и зону безопасности, связанные с их поведением.

Расчеты Pathfinder оправдали ожидания.

4.2. Групповое поведение

4.2.1. Введение

В этом примере проверяется влияние группировки на прохождение дверей. Мы используем ту же модель, что и в тестах на скорость потока через дверь, но агенты разбиты на группы по 3 и 5 человек.

4.2.2. Примечания по настройке

Модель показана на рисунке 65. Она такая же, как и предыдущая модель скорости потока через двери (режим рулевого управления с равномерным распределением скорости 1,19± 0,25 м/с), за исключением того, что пространство перед дверьми расширено, чтобы лидеры групп могли сделать паузу и подождать, пока остальные члены группы догонят их.

Использовалась динамическая группировка с числом членов в группе 3 и 5 и минимальным размером группы 1. Использовались два варианта формирования групп: плотная группа с максимальным расстоянием 1,0 м и временем замедления 3 с и группа со свойствами по умолчанию с максимальным расстоянием 2,0 м и временем замедления 3 с. Максимальная скорость была определена как равномерное распределение 1,19± 0,25

м/с. В результате скорость членов группы будет разной, поэтому более быстрые члены замедляются, чтобы сохранить группу.

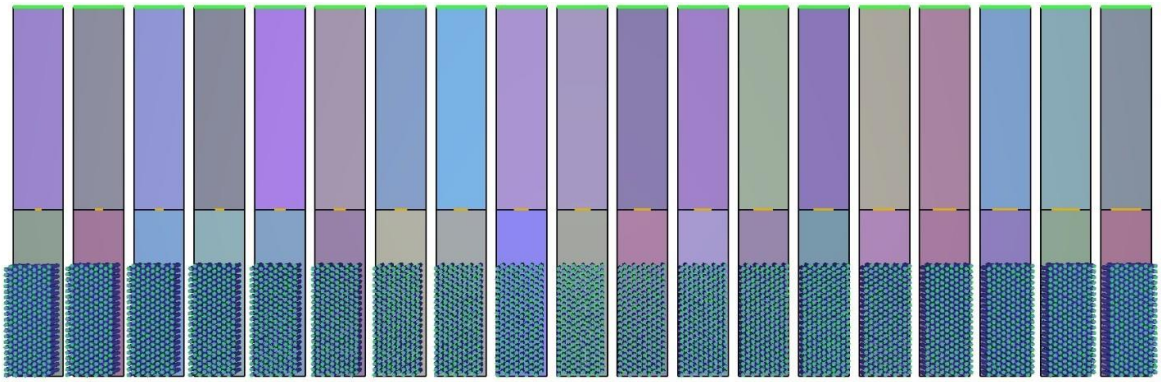


Рисунок 65. Модель, используемая для расчета через дверь с группами.

4.2.3. Результаты

На рисунках 66 - 70 показаны графики скорости потока через двери в режиме рулевого управления. Без группировки (Рисунок 66) скорость потока через дверь длиной 3 м немного меньше, чем в предыдущей модели. Это объясняется эффектом движения в коридоре, который немного замедляет движение через дверь.

При группировании скорость потока через дверь рулевого режима существенно не изменяется для параметров группирования по умолчанию, но уменьшается для параметров плотного группирования. Это связано с тем, что плотная группировка означает увеличение задержек при ожидании переформирования группы.

Группировка в режиме SFPE не изменяет скорость потока в дверях, Рисунок 71.

На рисунке 72 показаны результаты для режима Steering+ SFPE для плотной группировки с размером группы 5. Эти результаты показывают, что ограничение скорости потока через дверь еще больше замедляет скорость потока через дверь.

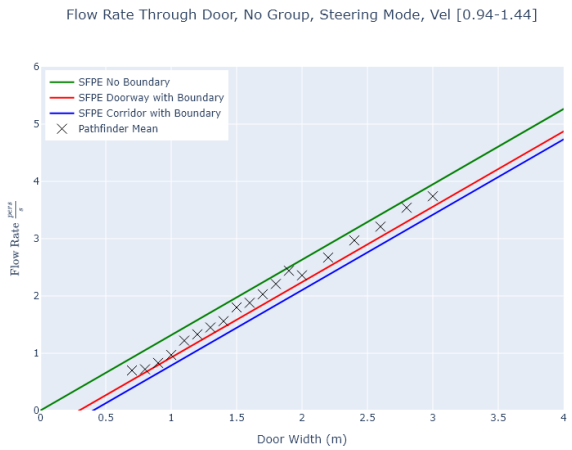


Рисунок 66 Поток без группировки

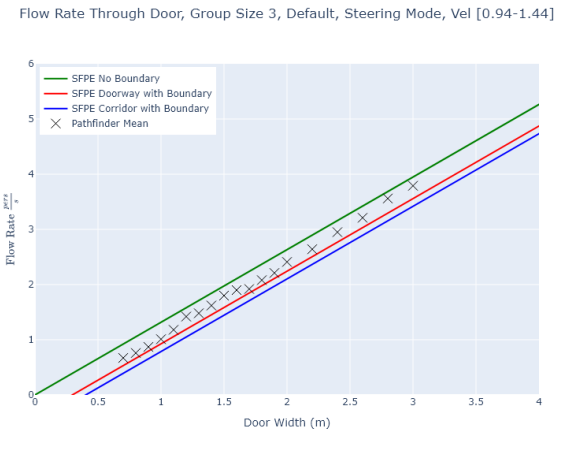


Рисунок 67 Поток для управляемого движения, с параметрами по умолчанию и размером группы 3

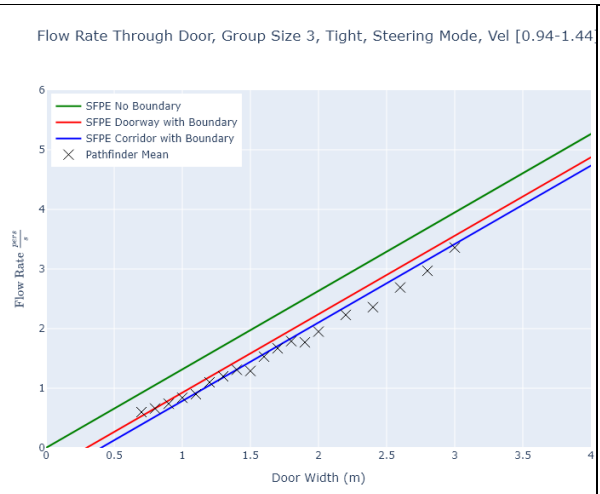


Рисунок 68 Поток для управляемого движения, для плотной группы и размером группы 3

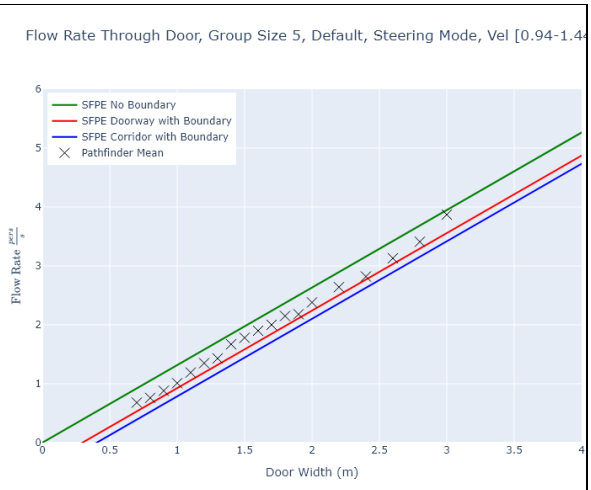


Рисунок 69 Поток для управляемого движения, с параметрами по умолчанию и размером группы 5

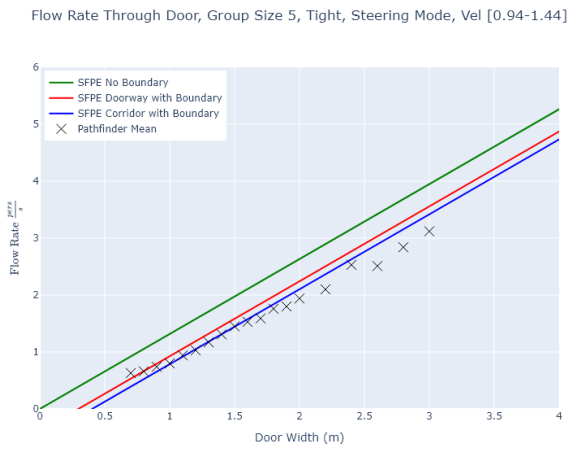


Рисунок 70 Поток для управляемого движения, с параметрами по умолчанию и плотной группой размера 5

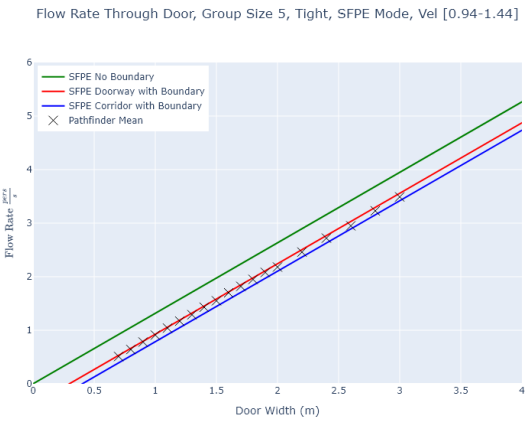


Рисунок 71 Поток для SFPE, с параметрами по умолчанию и плотной группой размера 5

4.2.4. Анализ

Тесные группы демонстрируют более медленное движение через двери. Для параметров группы по умолчанию, которые позволяют членам группы стать более разделенными, влияние на скорость потока через двери невелико.

Расчеты Pathfinder оправдали ожидания.

4.3. Слияние в коридорах

4.3.1. Введение

Этот тест расширяет проблему слияния коридоров, рассмотренную в работах Галеа и др. Galea, Шарпа и Лоуренса 2008. Задача состоит в том, чтобы два потока встретились на перекрестке и продолжили движение к выходу. К исходной задаче Галеа мы добавляем вариацию ширины коридора. Мы также добавляем геометрию Т-образного перекрестка, как описано в работе Zhang et al. Zhang et al. 2011.

4.3.2. Примечания по настройке

На рисунке 73 показана геометрия Galea ("примыкание") и типичное поведение при слиянии для коридора шириной 3 м. На рисунке 74 показана модель геометрии T-образного перекрестка ("противоположного") с типичным поведением при слиянии. Для обеих геометрий мы также решаем задачи для коридоров шириной 1 м.

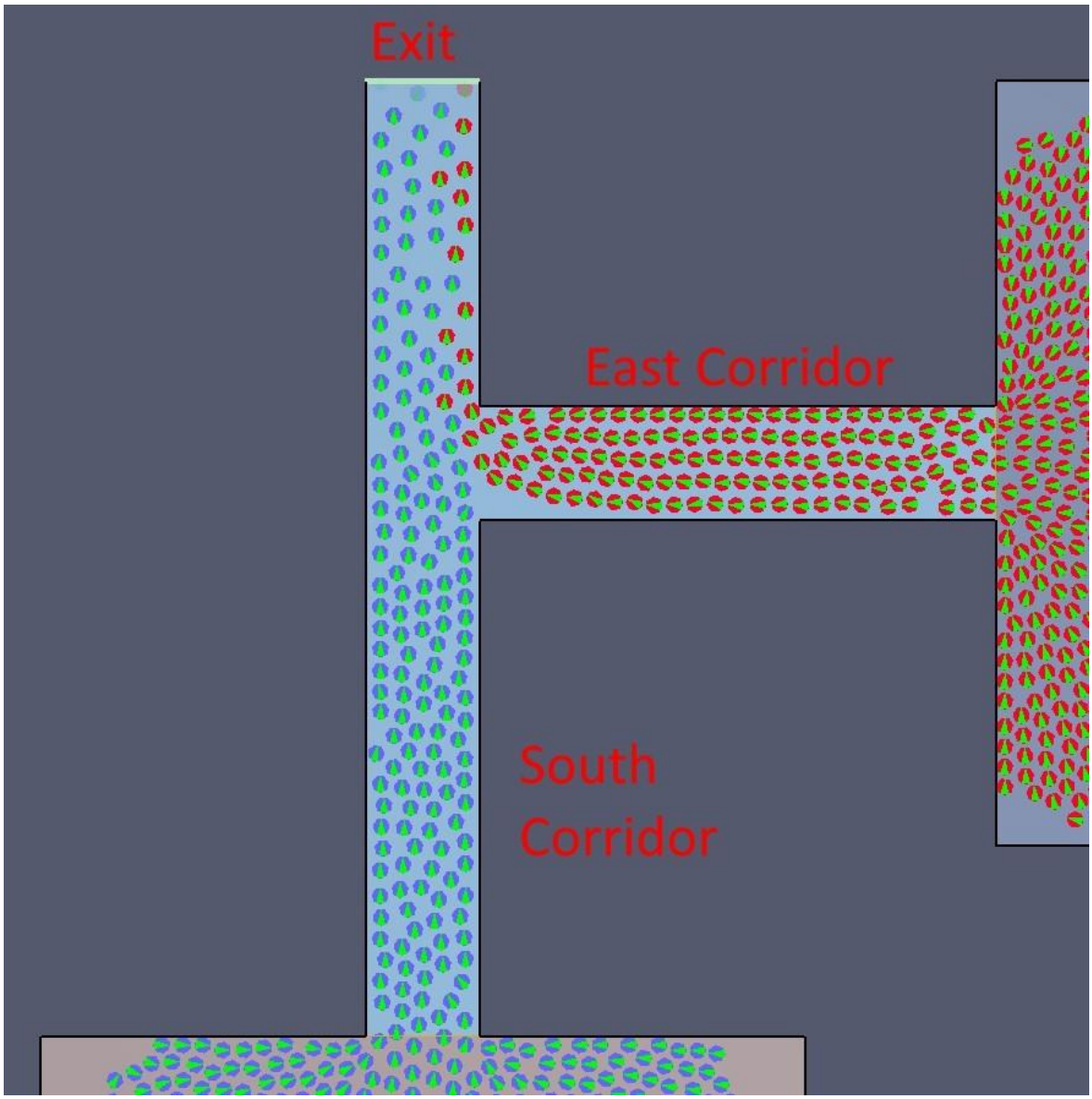


Рисунок 73. Модель для слияния на перекрестке коридоров. Называется "смежной" геометрией.

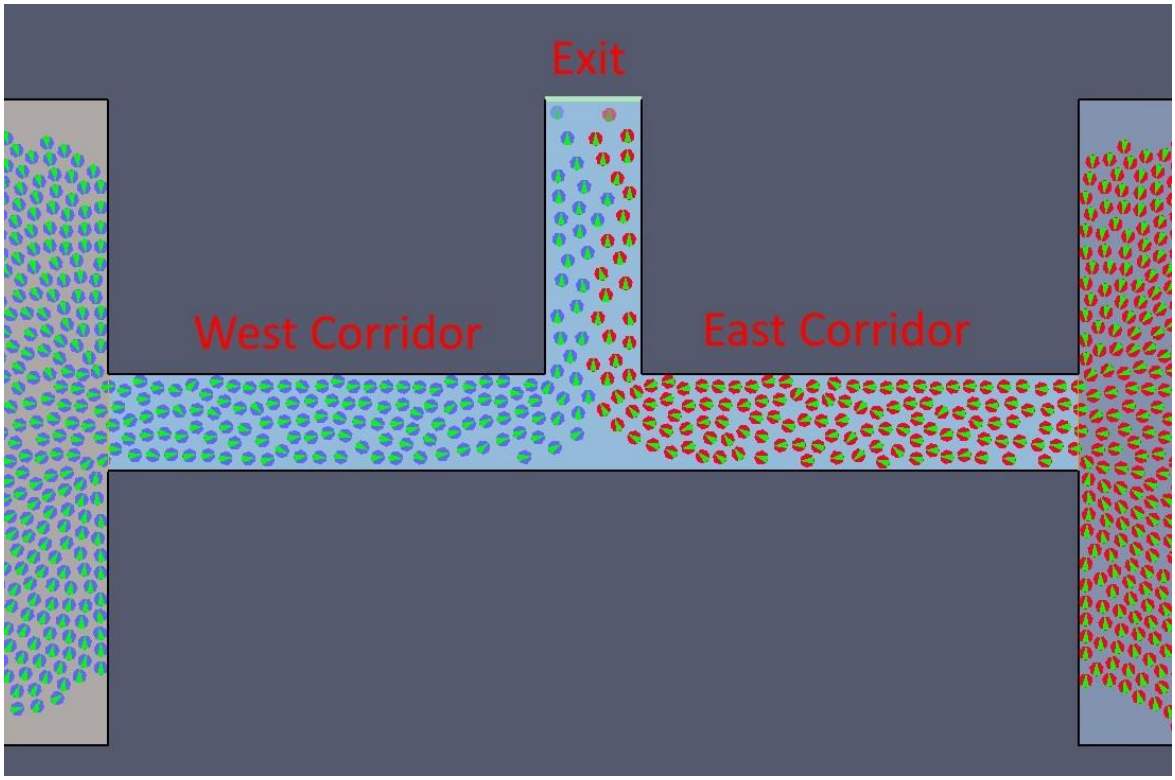


Рисунок 74. Геометрия Т-образного перекрестка, называемая "противоположной" геометрией.

4.3.3. Результаты

Коэффициенты слияния и скорости потока на выходе для смежной геометрии показаны на Рис. 75 и Рис. 76. Они были рассчитаны после того, как скорости потока в дверях достигли значений "устойчивого состояния". На Рисунке 77 и Рисунке 78 показаны те же результаты для "противоположной" геометрии.

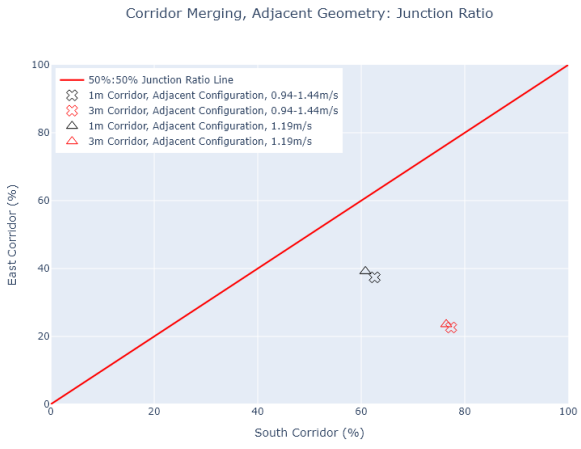


Рисунок 75. Коэффициенты слияния на Т-образном перекрестке для смежной конфигурации

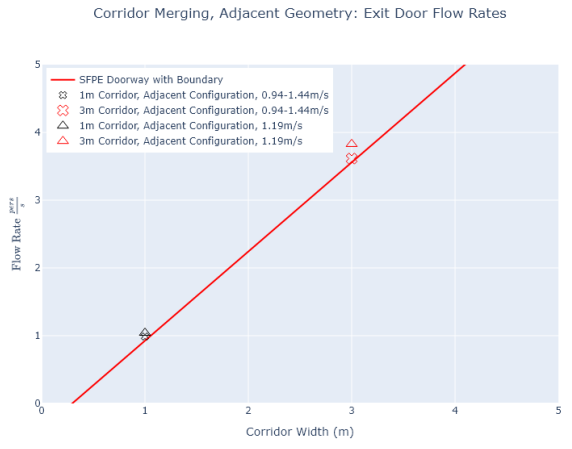


Рисунок 76. Расход через выходную дверь для смежной конфигурации

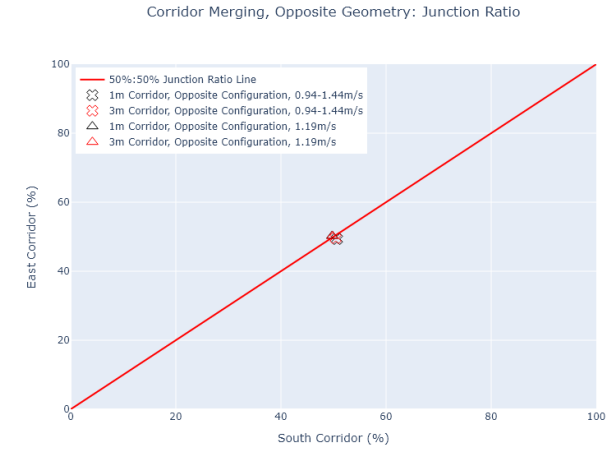


Рисунок 77. Коэффициенты слияния на Т-образном перекрестке для противоположной конфигурации

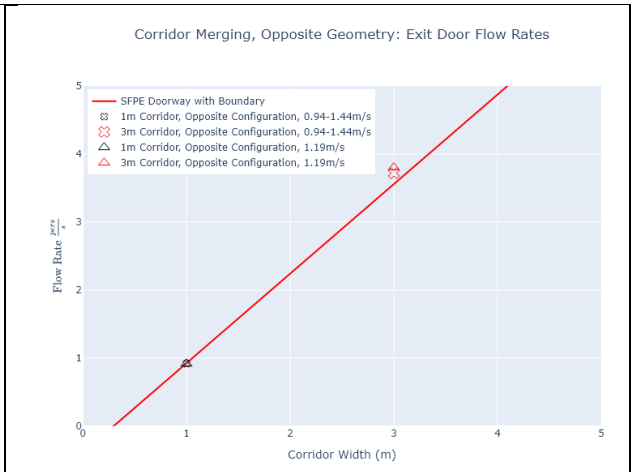


Рисунок 78. Расход через выходную дверь при противоположной конфигурации

4.3.4. Анализ

Во всех случаях для "противоположной" геометрии сливающиеся потоки уравновешиваются с в соотношении 50:50. Это соответствует экспериментальным результатам Zhang et al. (Zhang et al. 2011).

Случай "смежной" геометрии более интересен. Для коридора длиной 1 м коэффициент слияния благоприятствует потоку южного (прямого) коридора (примерно 60:40). Однако в более широком 3метровом коридоре поток южного (прямого) коридора сильно преобладает над потоком слияния (приблизительно 75:25). В работе Galea et al. (Galea, Sharp, and Lawrence 2008) рассматривается влияние различных параметров агентов на слияние, но не изучается влияние различной геометрии коридора.

Результаты Pathfinder удовлетворительны.

4.4. Слияние на лестницах

4.4.1. Введение

Этот тест расширяет проблему слияния на лестницах, рассмотренную в работах Galea et al. (Galea, Sharp и Lawrence 2008. В статье приводится классификация двух геометрий слияния лестниц: "смежные" (рисунок 79) и "противоположные" (рисунок 79), определяемые тем, как обитатели этажа сливаются на площадке по отношению к обитателям, спускающимся по лестнице.

Мы добавили третью "открытую" геометрию, в которой этаж имеет прямой доступ к выходной лестнице (Рисунок 81).

На следующих изображениях показана классификация геометрии слияния лестниц. Стрелки указывают направление "вверх" по лестнице, а не направление потока.

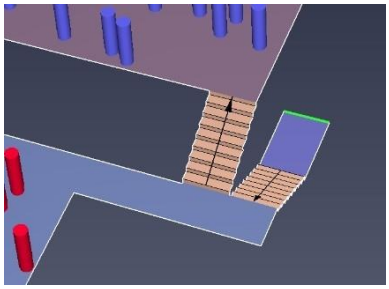


Рисунок 79. Прилегающие

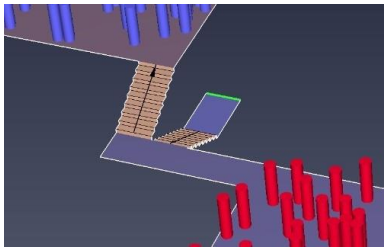


Рисунок 80. Противоположные

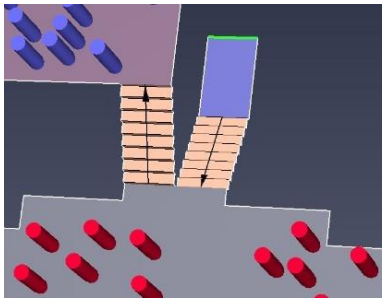


Рисунок 81. Открытые

4.4.2. Примечания по настройке

Ширина лестницы составляла 1,5 м, а решения были приняты для коридоров шириной1,0 м и 1,45 м (Рисунок 82). Первый этаж расположен на Z= 1,6 м, а второй - на 3,2 м. Подъем/пробег лестницы составляет примерно 7/11 при общей длине лестницы 2,97 м. Для этой лестницы руководство SFPE устанавливает скорость, составляющую 77% от скорости свободной ходьбы.

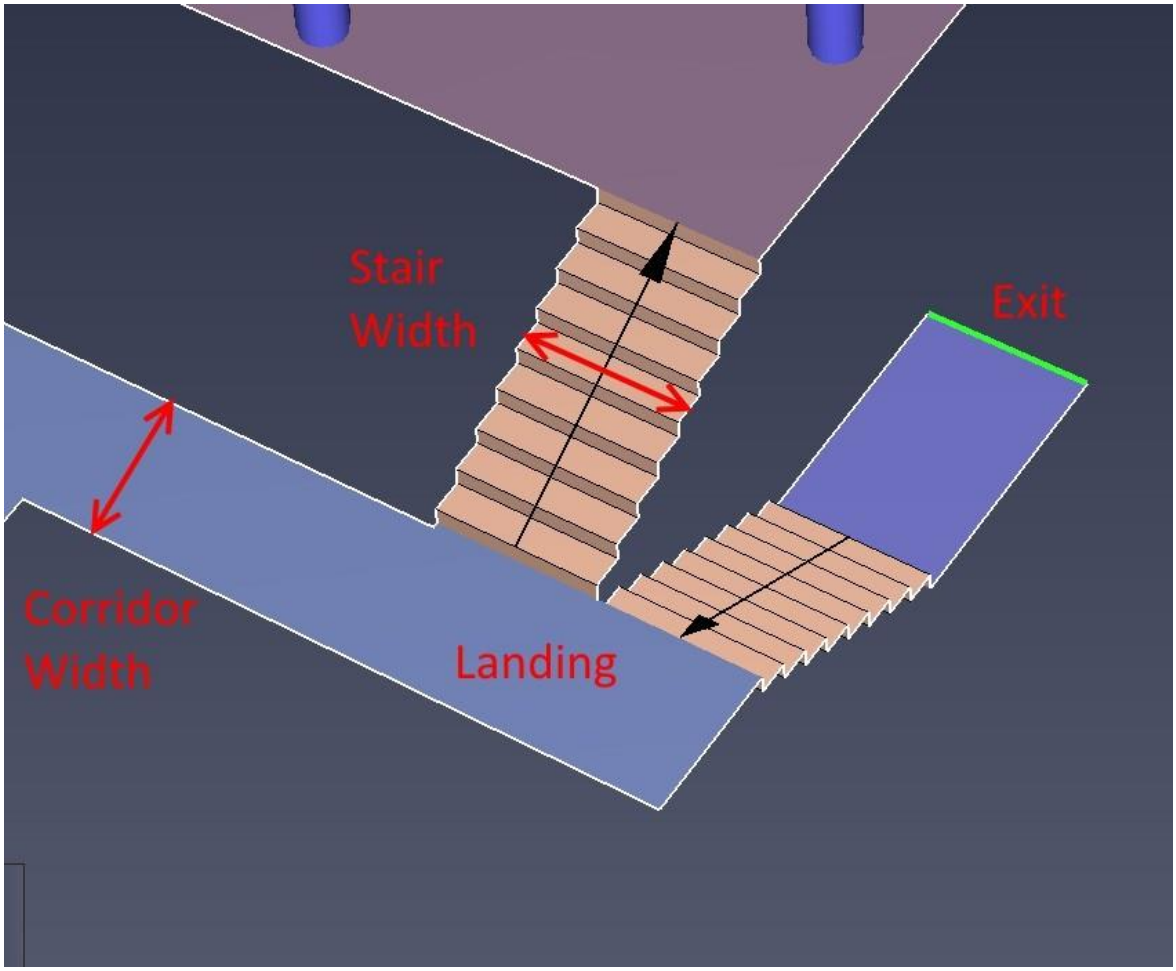


Рисунок 82. Геометрия слияния лестниц. Стрелки указывают направление "вверх" по лестнице, а не направление потока.

4.4.3. Результаты

Ниже показаны типичные результаты поведения при слиянии для смежной геометрии с шириной коридора 1,0 м (Рисунок 83) и 1,45 м (Рисунок 84). Для размеров агентов по

умолчанию узкий коридор шириной 1,0 м требует "ступенчатого" расположения, в то время как более широкий коридор позволяет ходить "бок о бок". В результате в более широком входном коридоре преобладает движение по этажу.

Коэффициенты слияния и скорости потока на выходе для всех случаев показаны на Рисунке 87, Рисунке 88, Рисунке 89 и Рисунке 90. В "открытой" геометрии при слиянии доминирует поток от этажа.

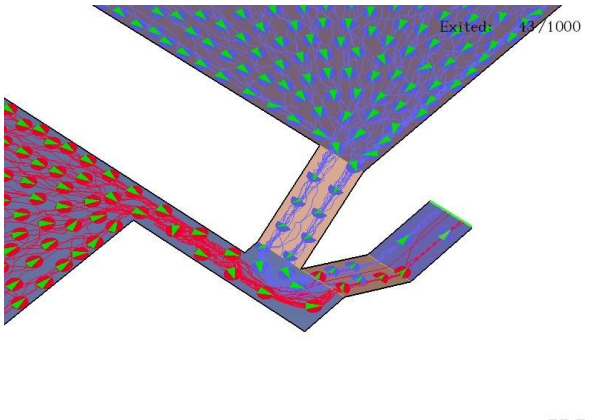


Рисунок 83. Вход в коридор шириной 1,0

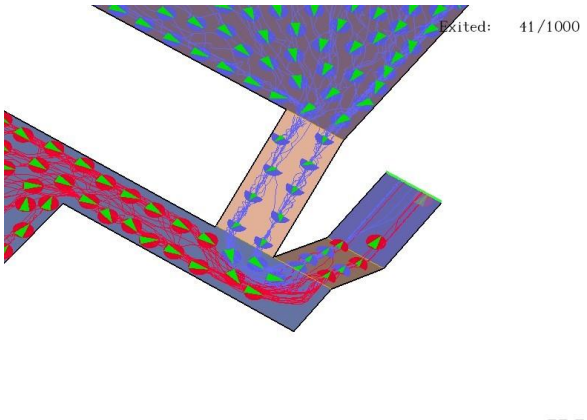


Рисунок 84. Вход в коридор 1,45 м

Ниже показано типичное поведение при слиянии для конфигурации "противоположный" со скоростью агентов 1,19 м/с и различной шириной входа в коридор.

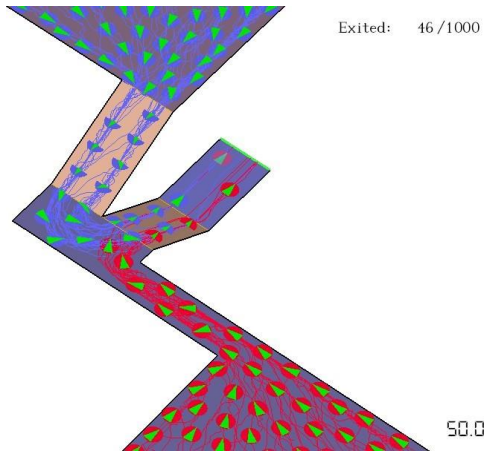


Рисунок 85. Вход в коридор шириной 1,0

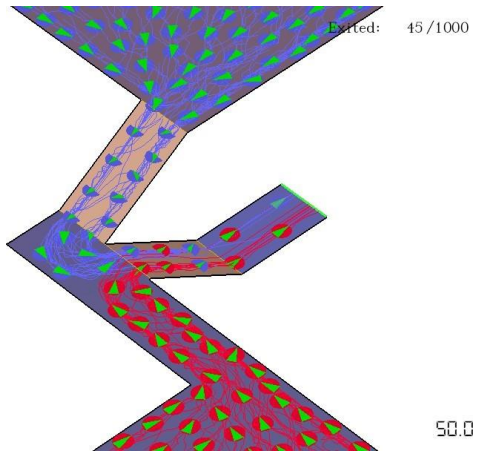
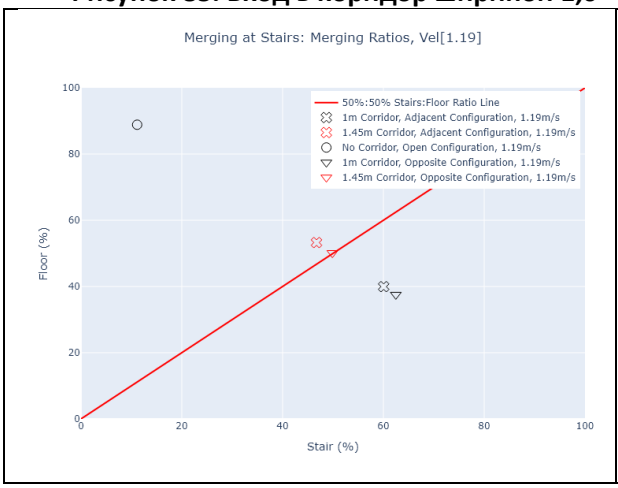


Рисунок 86. Вход в коридор 1,45 м



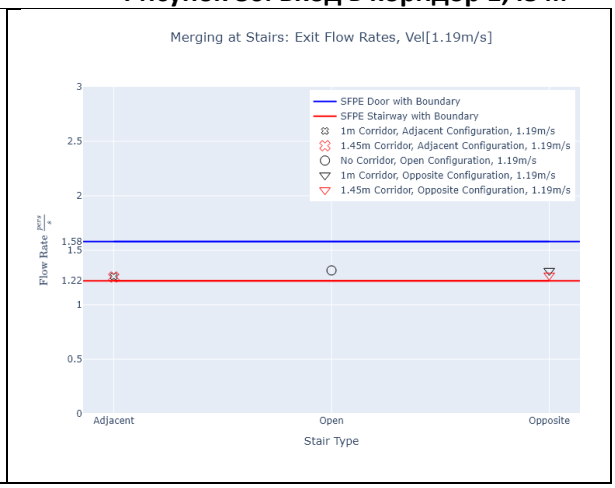


Рисунок 87. Коэффициенты слияния для слияния лестниц при постоянной максимальной скорости агента 1,19 м/с	Рисунок 88. Расход выходящего потока при слиянии лестниц с постоянной максимальной скоростью агента 1,19 м/с

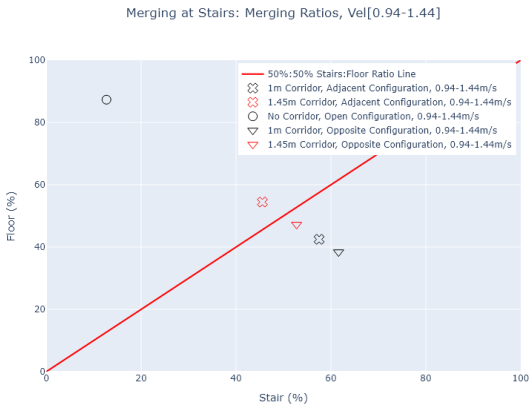
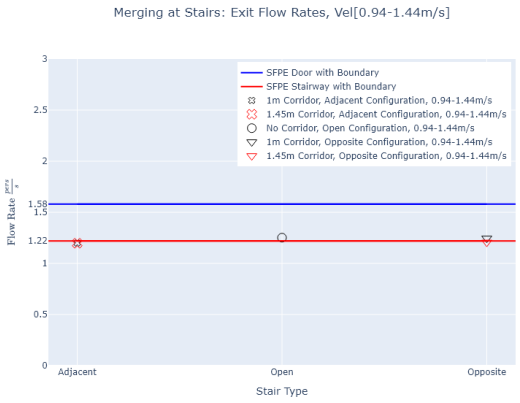

	

Рисунок 89. Коэффициенты слияния для слияния лестниц с равномерно распределенным максимумом скорости агента 1,19± 0,25 м/с	**Рисунок 88. Расход выходящего потока при слиянии лестниц с равномерно распределенным максимумом скорости агента 1,19± 0,25 м/с**

4.4.4. Анализ

Рассчитанные коэффициенты слияния попадают в диапазон экспериментальных данных, обобщенных Галеа и др. Galea, Шарпом и Лоуренсом 2008. Результаты совпадают с общей тенденцией, обсуждаемой в Galea et al., когда "противоположная" геометрия благоприятствует слиянию по сравнению с "смежной" геометрией. По-видимому, это связано с заторами, образующимися при слиянии. В случае "смежной" геометрии оба потока должны слиться, а затем проследовать на площадку, ведущую к выходу. В "противоположном" случае два потока приближаются к выходной лестнице примерно симметрично, что похоже на случай Т-образного перекрестка для слияния коридоров, рассмотренный выше.

Однако следует отметить, что Бойс и др. утверждают: "Результаты показывают, что, несмотря на различия в геометрическом расположении двери по отношению к лестнице и относительной ширине лестницы и двери, в каждом из исследованных зданий слияние происходило примерно в соотношении 50:50 в течение всего периода слияния". Бойс, Пурсер и Shields 2012 В их экспериментах было отмечено, как индивидуальное поведение может изменить соотношение слияний.

Скорость потока на выходе регулируется скоростью потока на лестнице, а не пропускной способностью выходной двери.

Результаты Pathfinder удовлетворительны.

4.5. Обгон медленных агентов на лестнице

4.5.1. Введение

В этом испытании оценивается способность Pathfinder имитировать поведение медленных агентов на лестнице. Предполагается, что при достаточной ширине лестницы более быстрые агенты будут обгонять более медленных.

Однако фактическое воздействие инвалидов или раненых на лестницах может быть сложным. Аверилл и др. в своем отчете о поведении людей и эвакуации во время катастрофы во Всемирном торговом центре Averill et al. 2005) отметили следующие различные ситуации:

- "51 процент населения WTC 1 и 33 процента населения WTC 2 в 2001 году отметили, что раненые и инвалиды на лестничной клетке были препятствием для эвакуации. Однако здоровые быстро помогали этим людям, направляя их во время эвакуации или просто отходя в сторону лестничной клетки, чтобы пропустить раненых и других нуждающихся, когда они могли пройти".
- "В некоторых случаях люди отмечали, что на лестнице они пропускали более медленных людей с ограниченными возможностями передвижения и даже замедлялись или останавливались за ними.
- "Наконец, некоторые люди сообщили, что люди с ограниченными возможностями передвижения ждали на лестнице и/или на лестничной площадке, пока им помогут другие или их спасет пожарная команда".

При моделировании пользователь должен знать о таких ситуациях и моделировать соответствующим образом.

4.5.2. Примечания по настройке

Для данного исследования использовалась та же модель, что и для исследования ширины лестницы. Ширина дверей варьируется от 0,7 м до 3,0 м, ширина входного коридора - 5 м. Общий подъем лестницы составляет 7 м, а пролет - 11 м.

Были определены два профиля агентов: профиль по умолчанию с равномерным распределением скорости 1,19± 0,25 м/с и медленный профиль с постоянной скоростью 0,5 м/с. Скорость 0,5 м/с - это нижний предел скорости ходьбы для людей с ограниченными возможностями, описанной на рисунке 47 Руководства SFPE (SFPE 2016).

10 процентов агентов получили медленный профиль (красные агенты на рисунке 91). Использовался режим рулевого управления, поскольку именно в этом режиме используется поведение при проходе.

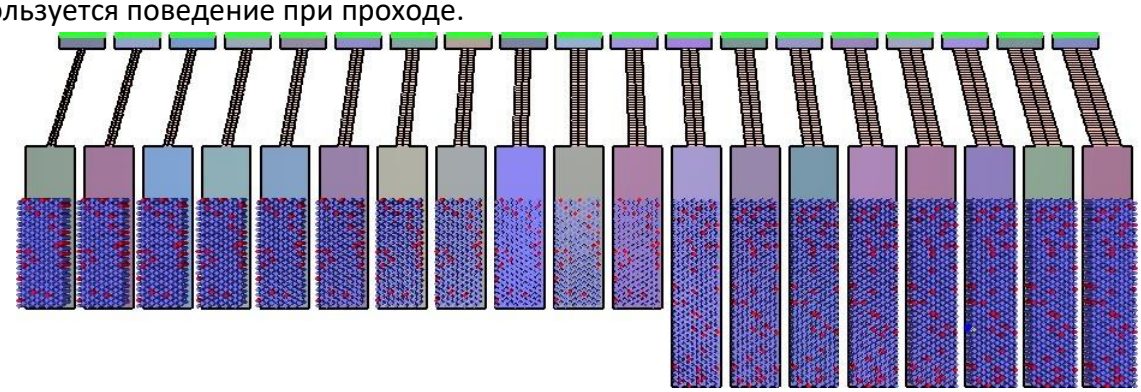


Рисунок 91. Модель Pathfinder, использованная для изучения скорости движения по лестнице с агентами с ограниченными возможностями передвижения (красный цвет).

4.5.3. Результаты

Скорость потока на лестнице с людьми с ограниченными возможностями передвижения показана на рисунке 92. Эти данные были усреднены по периодам времени, когда различные лестницы достигали "устойчивого состояния" потока. Для сравнения, красные линии показывают скорость потока SFPE для ширины лестницы и границы 0,15 м.

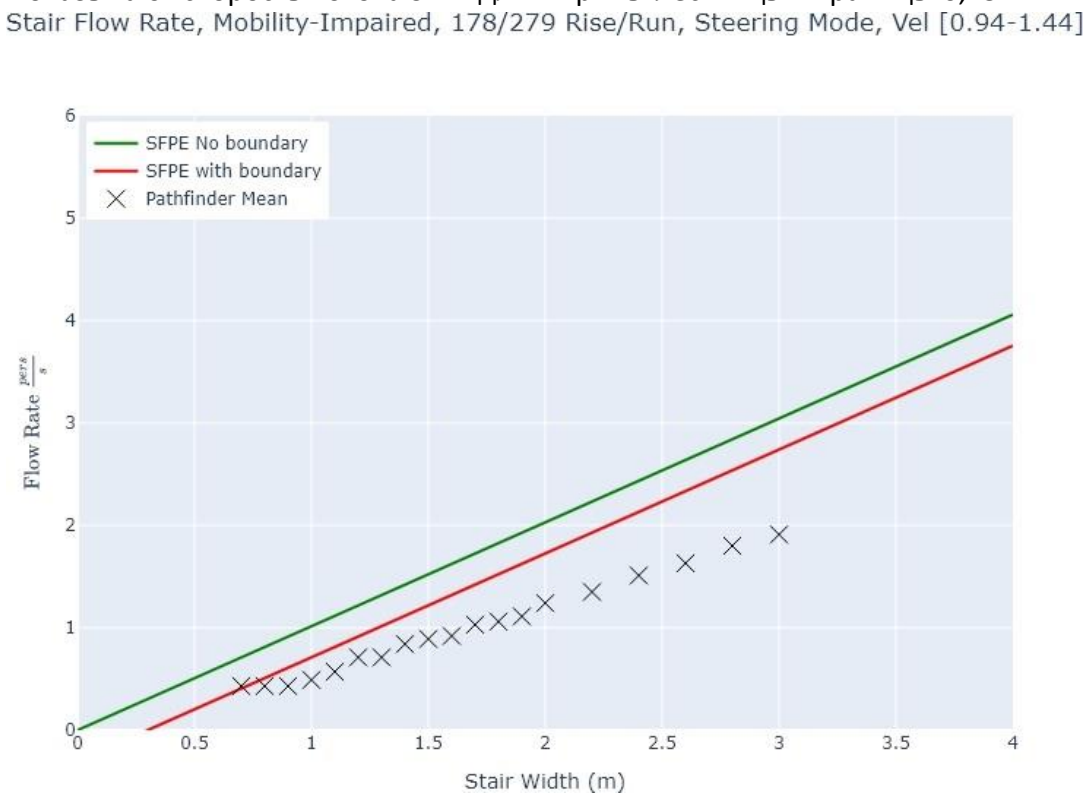


Рисунок 92. Скорость потока на лестнице для режима "управление", 90 процентов людей имеют распределение максимальной скорости 1,19± 0,25 м/с, 10 процентов имеют постоянную скорость 0,5 м/с.

4.5.4. Анализ

Присутствие людей с ограниченными возможностями передвижения снижает скорость движения по лестнице (сравните с рисунком 50). Экспериментальные данные для сравнения отсутствуют, но тенденция вполне обоснована.

4.6. Загрузка лифта

Эта проблема проверяет загрузку лифта.

4.6.1. Введение

100 человек находятся в помещении размером 10x10 м на высоте 10 м. Люди выходят из лифта шириной 2 м и глубиной 1,7 м, что соответствует типичной загрузке лифта около 16 человек (Klote and Alvord 1992), а ширина дверей лифта составляет 1,2 м. Лифты имеют время открытия+ закрытия 7,0 с, время подъема и выгрузки 10,0 с, задержки открытия и закрытия 5,0 с (более подробную информацию см. в руководстве пользователя Pathfinder).

Имеется четыре лифта с заданными номинальными нагрузками 5, 10, 20 и 50 человек (Рисунок 93).

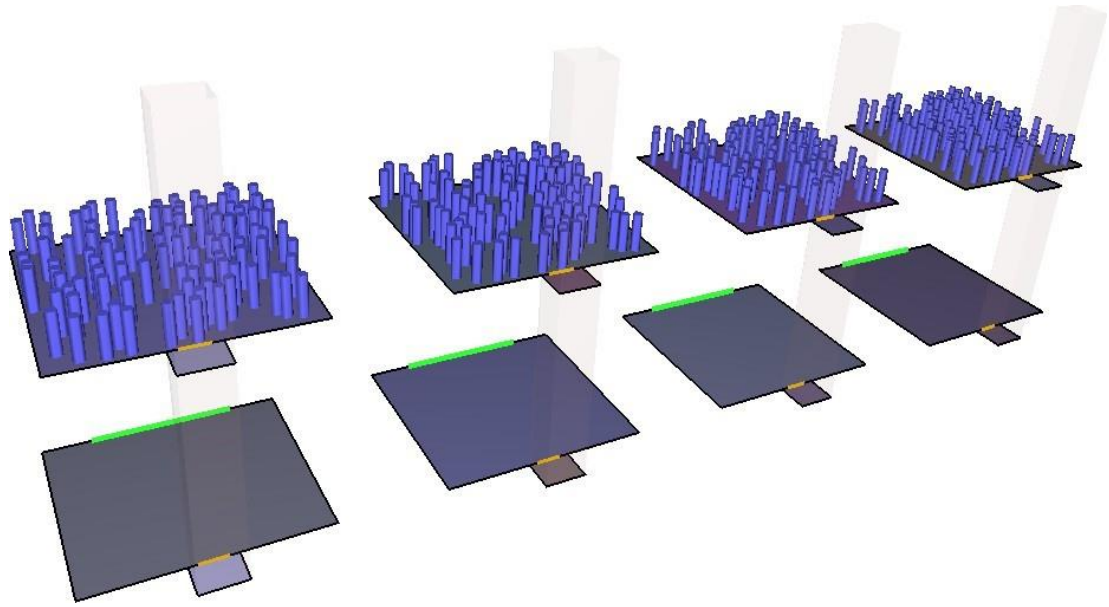


Рисунок 93. Испытание лифта на нагрузку

4.6.2. Примечания по настройке

Эти четыре задачи независимы друг от друга, поэтому допускают быструю проверку.

4.6.3. Результаты

Результирующие загрузки лифта при моделировании рулевого управления показаны на рисунке 94 и соответствуют ожидаемым результатам. Результаты для режимов Steering+ SFPE и SFPE также соответствуют ожидаемым результатам.

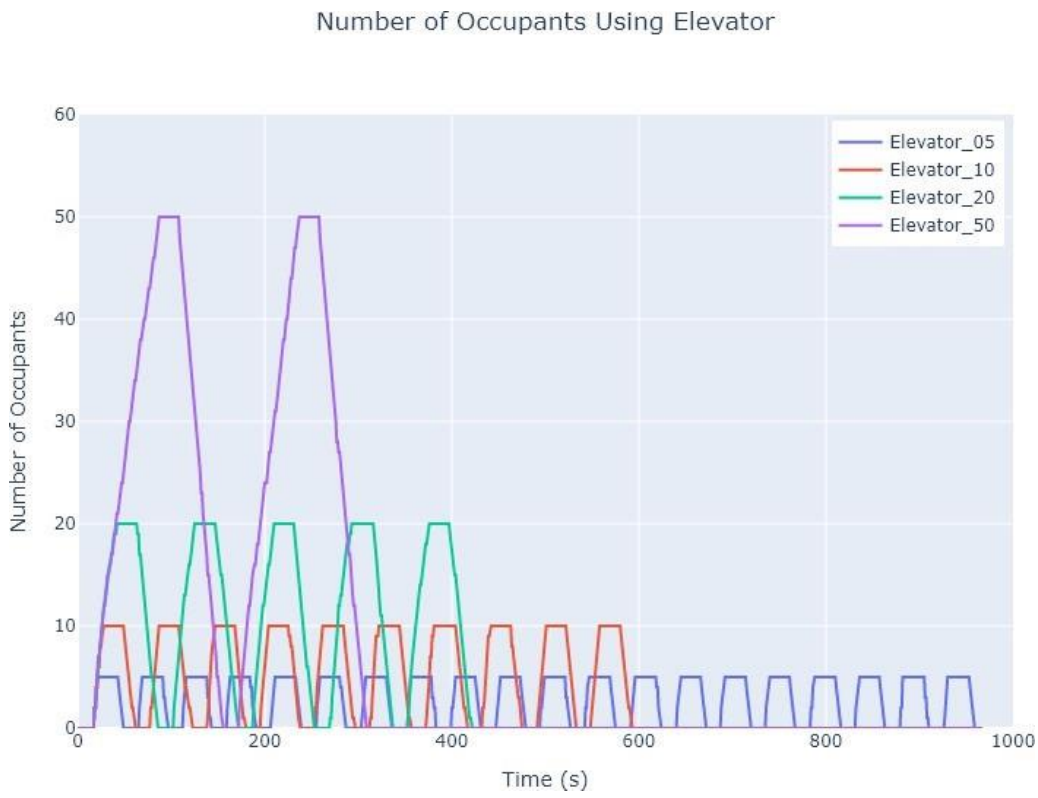


Рисунок 94. Наблюдаемая нагрузка на лифт для режима рулевого управления

4.6.4. Анализ

Загрузка лифтов соответствует ожидаемым значениям.

4.7. Использование коридора при прохождении поворотов

В этом примере проверяется использование ширины коридора при прохождении поворотов.

4.7.1. Введение

Этот пример был первоначально представлен в Техническом справочнике и руководстве пользователя FDS-Evac (Korhonen 2018). В задаче описывается помещение, заполненное 1000 агентами. Начальное помещение имеет размеры 50 м x 60 м. Справа находится дверной проем длиной 7,2 м, ведущий в коридор длиной 7,2 м. Коридор резко поворачивает налево и ведет к выходу.

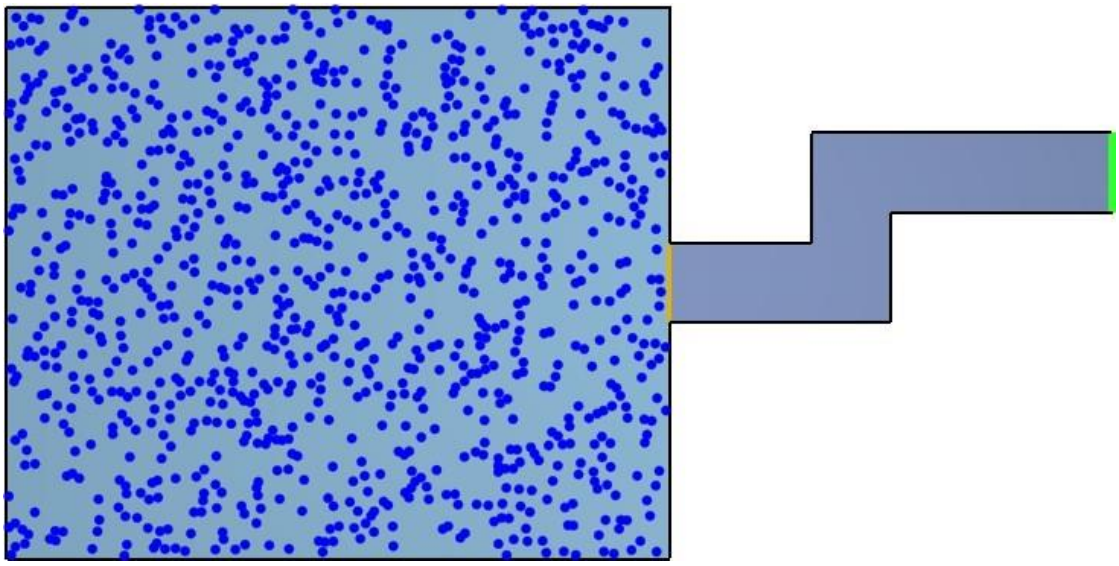


Рисунок 95. Начальная конфигурация модели

В этой задаче интерес представляет угол в коридоре. В зависимости от того, как разные симуляторы справляются с движением больших групп вокруг угла, разные симуляторы могут дать существенно разные результаты. Примечательно, что текущие исследования движения дают нам мало указаний на "правильное" решение этой проблемы.

4.7.2. Примечания по настройке

Помимо задачи с двумя поворотами, мы смоделировали один поворот и прямой коридор без поворота. Представлены результаты только в режиме рулевого управления, поскольку именно в этом случае угол замедляет движение.

4.7.3. Результаты

Основной интерес представляет то, насколько эффективно симулятор использует всю ширину коридора и угла, Рисунок 96. В симуляторе Pathfinder наблюдается некоторая группировка в вертикальной части коридора. Это результат повышенной плотности, которая приводит к замедлению движения.

Время выхода всех людей составило 164 секунды для прямого коридора, 163 секунды для одного поворота и 185 секунд для двух поворотов.

Модель с прямым коридором имеет ширину 7,2 м и длину пути от помещения до выхода 41,5 м. Расчет SFPE с использованием скорости потока и скорости ходьбы при плотности 1,88 чел/м2 и дает общее время 171 секунды.

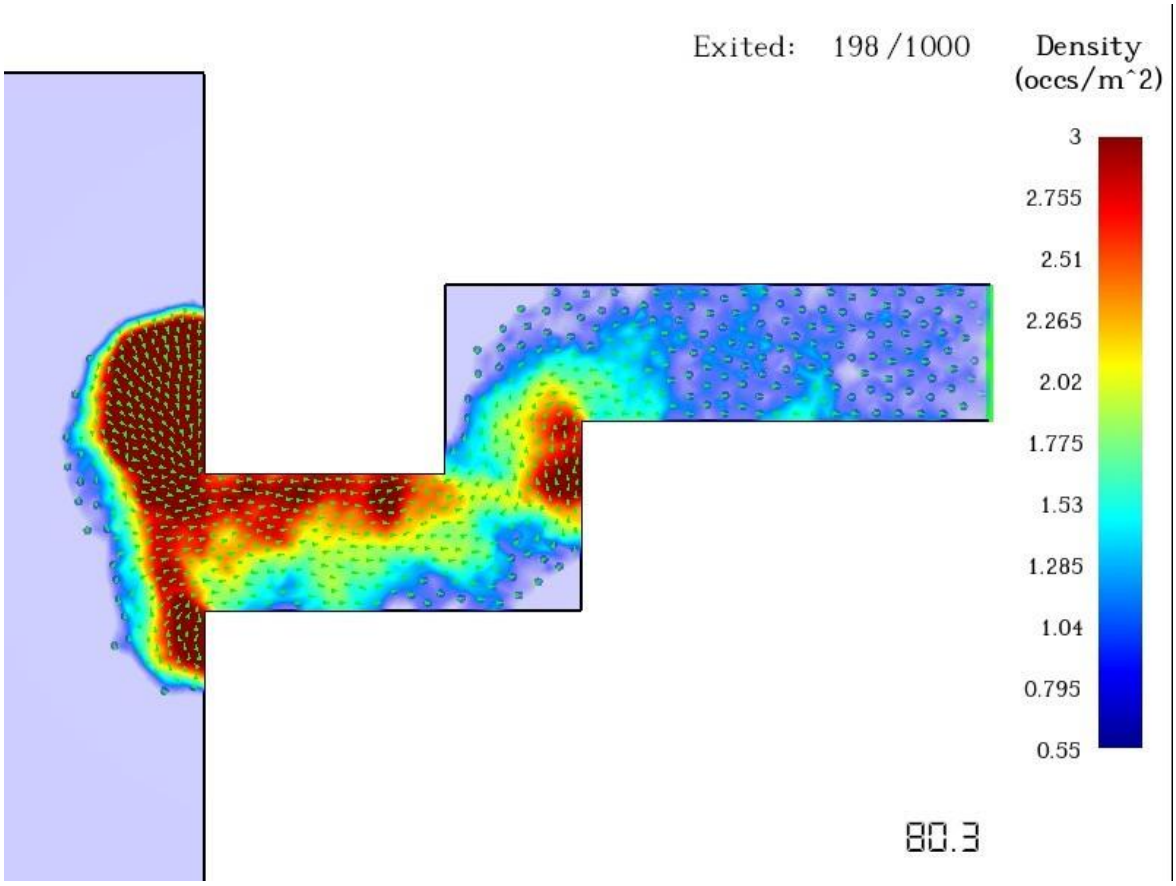


Рисунок 96. Режим рулевого управления, показывающий использование коридора с двумя углами.

4.7.4. Анализ

Результаты Pathfinder вполне разумны.

5. Специальные возможности программы

5.1. Помощь при эвакуации

5.1.1. Скорость передвижения по ровной поверхности

Этот тест проверяет, что во время эвакуации скорость движения контролируется скоростью движения человека, которому оказывается помощь.

5.1.1.1. Введение

Задача представляет собой коридор, в одном конце которого находятся ассистенты, а в центре коридора - пациент, нуждающийся в помощи. Ассистенты сначала самостоятельно двигаются к пациенту, а затем помогают ему дойти до выхода. Изначально ассистенты будут использовать свою скорость самостоятельной ходьбы, но при оказании помощи будут использовать скорость пациента.

5.1.1.2. Примечания по настройке

На рисунке 97 показана геометрия испытания. Скорость ассистентов по умолчанию составляет 1,19 м/с. а скорость движения кровати составляет 1 м/с.

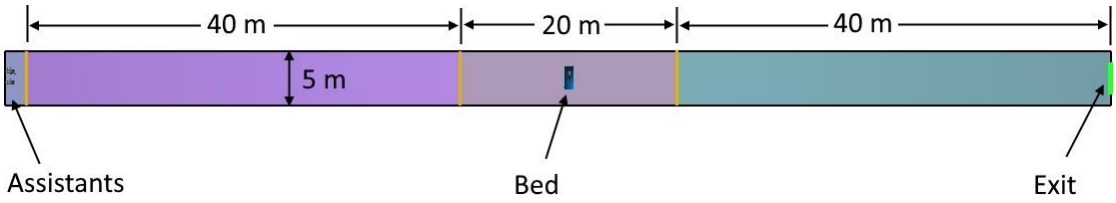


Рисунок 97. Тест скорости движения при эвакуации.

5.1.1.3. Результаты

Скорость ассистентов, передвигающихся самостоятельно и помогающих пациенту на кровати, приведена в таблице 2. Эти данные были взяты из выходного файла csv с данными о агентах.

Таблица 2. Скорость движения в различных состояниях.

Режим	Независимая скорость, м/с	Скорость при оказании помощи, м/с
Рулевое управление	1.19	1.0
SFPE	1.19	1.0
Рулевое управление+ SFPE	1.19	1.0

5.1.1.4. Анализ

Во всех случаях правильно указана скорость самостоятельной ходьбы, и при оказании помощи лежачему пациенту скорость меняется на скорость движения кровати.

5.1.2. Лестница вверх

Этот тест проверяет, что во время эвакуации скорость движения вверх по лестнице зависит от скорости движения человека, которому оказывается помощь.

5.1.2.1. Введение

Это испытание аналогично испытанию с ровной поверхностью, только теперь агенты поднимаются по лестнице со ступенью 17,5 см и проступью 29,0 см.

5.1.2.2. Примечания по настройке

Ширина лестницы - 1,1 м. Общее горизонтальное расстояние лестницы - 40 м, вертикальное - 24 м, таким образом, диагональное расстояние на лестнице - 46,64 м. Скорость движения пациента по лестнице - 0,3 м/с.

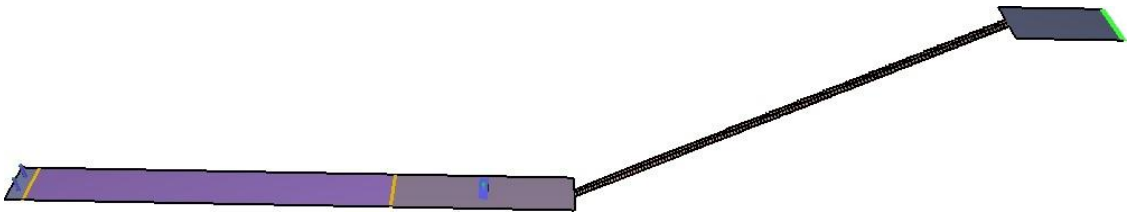


Рисунок 98. Модель движения эвакуации по лестнице.

5.1.2.3. Результаты

Скорость помощников, передвигающихся самостоятельно и помогающих пациенту с кроватью подняться по лестнице, приведена в следующей таблице. Эти данные были взяты из выходного файла csv с данными о агентах.

Таблица 3. Скорость передвижения при оказании помощи при подъеме по лестнице.

Режим	Независимая скорость, м/с	Скорость при оказании помощи, м/с
Рулевое управление	1.19	0.3
SFPE	1.19	0.79
Рулевое управление+ SFPE	1.19	0.3

5.1.2.4. Анализ

Во всех случаях правильно отображается заданная скорость самостоятельной ходьбы. Для режима SFPE скорость подъема по лестнице определяется корреляцией SFPE, а не задается пользователем.

5.1.3. Лестница вниз

Этот тест проверяет, что во время эвакуации скорость движения по лестнице зависит от скорости движения человека, которому оказывается помощь.

5.1.3.1. Введение

Это испытание аналогично испытанию с ровной поверхностью, только теперь агенты спускаются по лестнице со ступенью 17,5 см и проступью 29,0 см.

5.1.3.2. Примечания по настройке

Ширина лестницы - 1,1 м. Общее горизонтальное расстояние лестницы - 40 м, вертикальное - 24 м, таким образом, диагональное расстояние по лестнице - 46,64 м. Скорость спуска по лестнице была задана как 0,5 м/с.

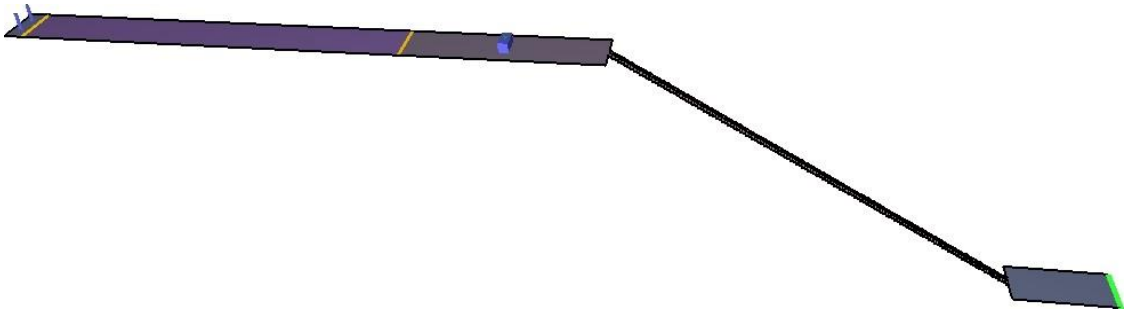


Рисунок 99. Модель движения эвакуации по лестнице.

5.1.3.3. Результаты

Скорость помощников, передвигающихся самостоятельно и помогающих спуститься по лестнице лежачему пациенту, показана в следующей таблице. Эти данные были взяты из выходного файла csv с данными о агентах.

Таблица 4. Скорость передвижения при оказании помощи при спуске по лестнице.

Режим	Независимая скорость (м/с)	Скорость при оказании помощи (м/с)
Рулевое управление	1.19	0.5
SFPE	1.19	0.79
Рулевое управление+ SFPE	1.19	0.5

5.1.3.4. Анализ

Во всех случаях правильно отображается заданная скорость самостоятельной ходьбы. Для режима SFPE скорость спуска по лестнице определяется коррекцией SFPE, а не задается пользователем.

5.1.4. Назначение команды помощи

Этот тест проверяет возможность назначения помощников в команды и последующего назначения людей, нуждающихся в помощи при эвакуации, для оказания помощи конкретными командами.

5.1.4.1. Введение

В команде семь помощников: пятеро - красные и двое - синие. Агенты, которым нужна помощь, делятся поровну, так что шести агентам будет помогать красная команда, а шести - синяя.

5.1.4.2. Примечания по настройке

На рис. 100 показана модель, используемая для проверки назначения бригад помощи. Меньшие агенты, нуждающиеся в помощи, - это инвалидные коляски, а большие - кровати.

Каждая команда должна сначала эвакуировать инвалидные кресла, а затем кровати.

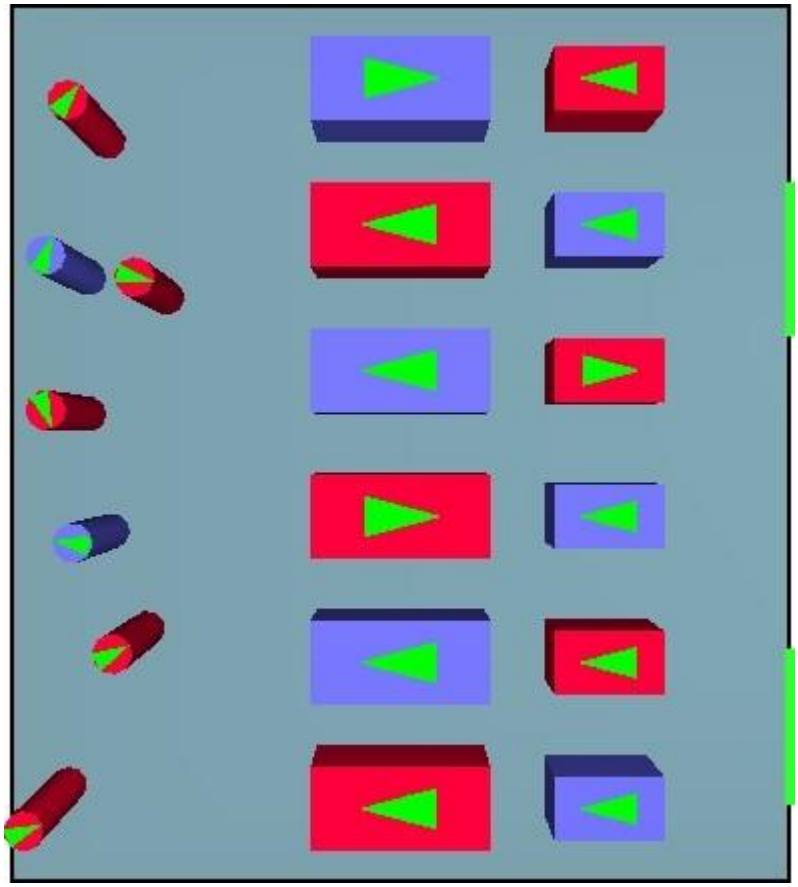


Рисунок 100. Модель для проверки назначения различных команд ассистентов жильцам, нуждающимся в помощи.

5.1.4.3. Результаты

На рисунке 101 показан результат на ранней стадии эвакуации: сначала оказывают помощь инвалидным коляскам. Три члена красной команды оказывают помощь инвалидным креслам, поэтому два других члена красной команды оказывают помощь кровати. Два члена синей команды оказывают помощь инвалидным креслам. Если путь для людей, которым оказывается помощь, заблокирован, то кровати (или другие транспортные средства), которым оказывается помощь, кратко изображаются в виде цилиндров, чтобы обеспечить некоторое перекрытие с блокирующими креслами-колясками (транспортными средствами).

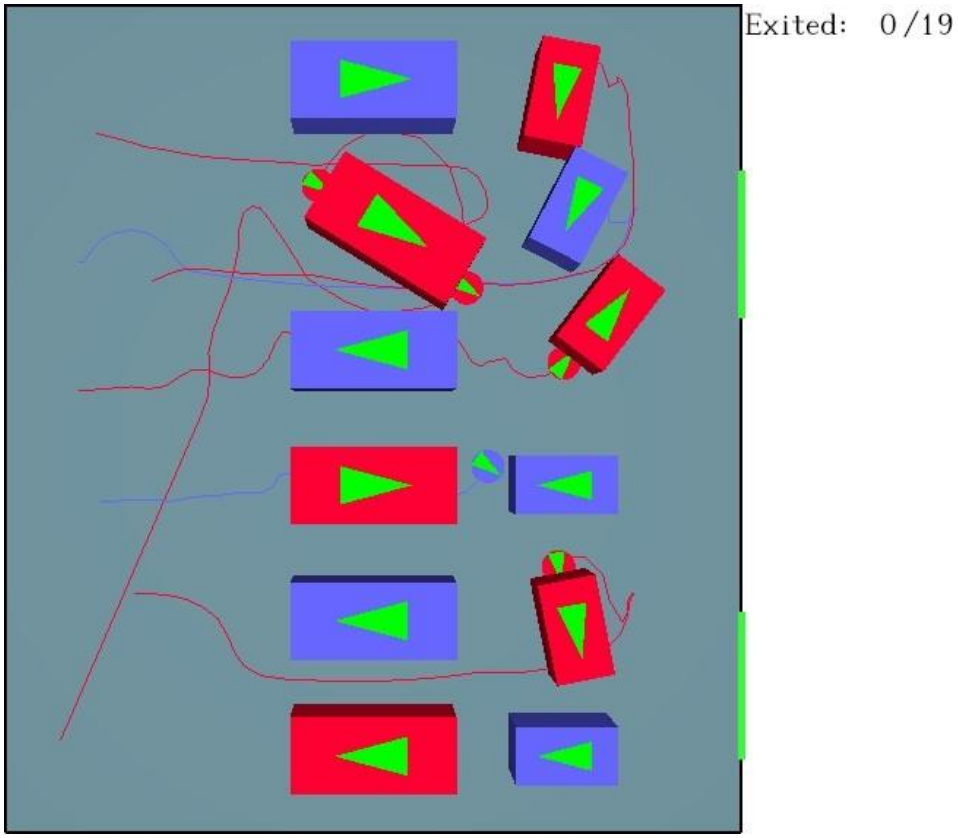


Рисунок 101. Движение на 10 секунде. Обратите внимание, что порядок эвакуации - сначала инвалидные коляски.

На рисунке 102 показано движение к концу моделирования. Обратите внимание, что красные агенты, нуждающиеся в помощи, уже почти все получили ее. На оказание помощи синим агентам уходит больше времени, поскольку в синей команде всего два человека.

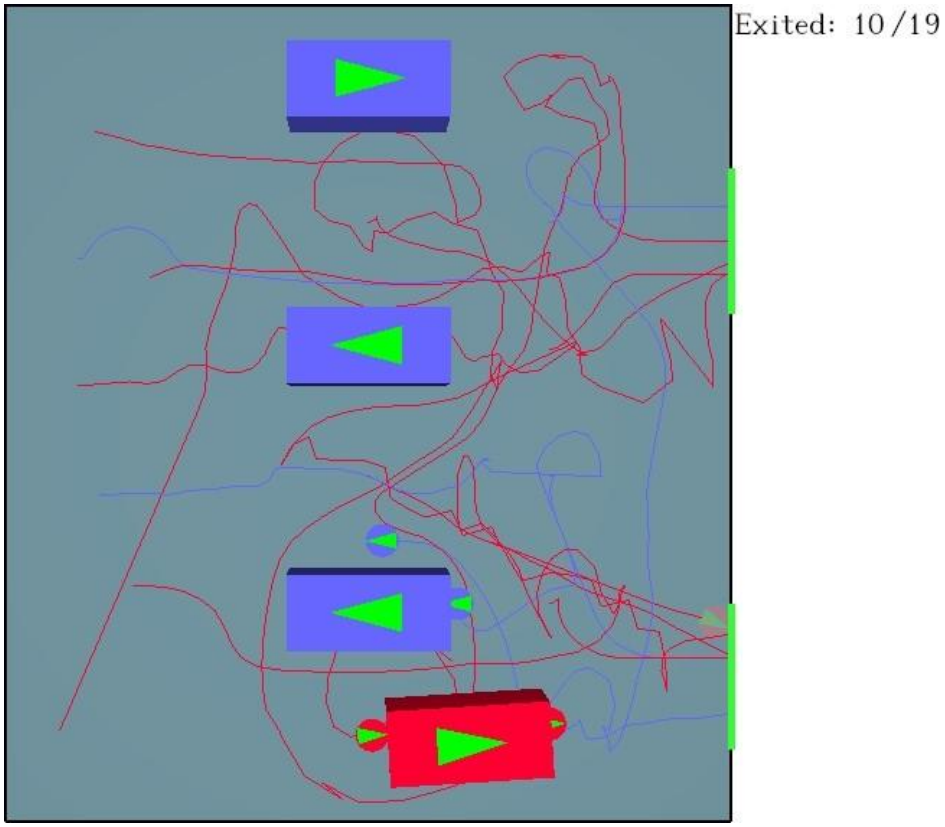


Рисунок 102. Движение на 27 секунде, ближе к концу моделирования.

5.1.4.4. Анализ

Помощники из красной команды эвакуировали только красных людей, а из синей - только синих. Оказание помощи синим агентам заняло больше времени, поскольку в синей команде было меньше членов.

Кровати и кресла-каталки двигались, как положено, по возможности избегая других кроватей и кресел-каталок, а если они оказывались заблокированными, то ненадолго, допуская некоторое перекрытие.

Когда каждая команда выполнила поставленные задачи, они вышли из модели.

Поведение помощников соответствует ожиданиям.

5.1.5. Моделирование эвакуации в больнице Гента

Этот тест воспроизводит моделирование эвакуации с 11-го этажа больницы, как описано в статье Ханта и др. (Hunt, Галеа и Лоуренса 2013).

5.1.5.1. Введение

Как говорится в статье, "были собраны данные 32 испытаний, в ходе которых испытуемый был эвакуирован через 11 этажей больницы Гентского университета с помощью четырех широко используемых устройств для помощи в передвижении: носилок, кресла для переноски, эвакуационного кресла и спасательной простыни". На основе этих данных было проведено моделирование эвакуации 28 пациентов с использованием различных устройств, разного количества персонала, а также мужских и женских команд.

Мы воспроизведем два сценария:

1. Женская бригада дневной смены использует эвакуационные кресла
2. Мужская бригада ночной смены использует носилки.

5.1.5.2. Примечания по настройке

На рисунке 103 показана базовая геометрия этажа больницы, подлежащего эвакуации. На этом рисунке некоторые размеры, такие как ширина дверей в коридорах, были оценены путем масштабирования чертежа.

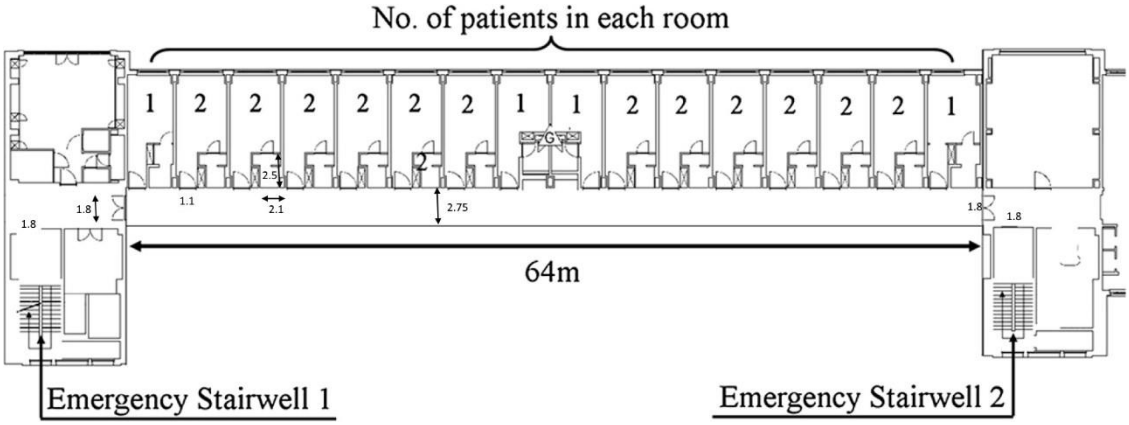


Рисунок 103. Геометрия этажа 11 с пациентами Хант, Галеа и Лоренс 2013.

На рисунке 104 показана геометрия лестницы. Основные размеры лестницы: подъем каждой ступени составляет 17,5 см, а проступь - 29 см, в каждом лестничном марше 12 ступеней (в данной модели не учтена деталь, что в маршах между этажами 2 и 3 всего 10 подъемов), а ширина лестницы между перилами составляет 1,4 м.

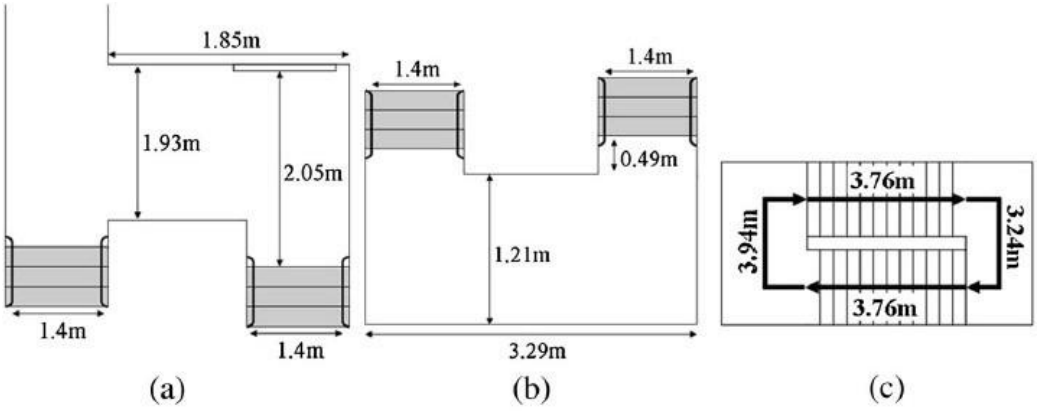


Figure 4. Stair dimensions.

Рисунок 104. Геометрия лестницы Хант, Галеа и Лоуренс 2013.

Геометрия эвакуационного кресла Рисунок 105, эвакуационных носилок Рисунок 106 и позиций ассистентов показана ниже.

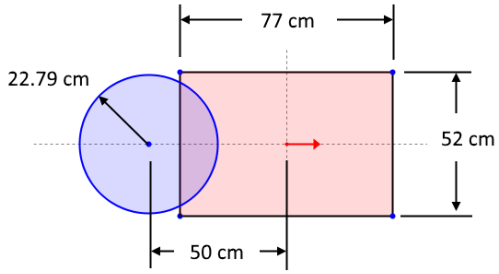


Рисунок 105. Эвакуационное кресло (1 помощник)

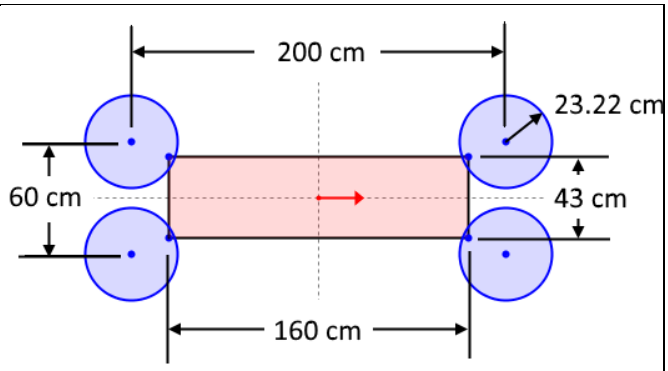


Рисунок 106. Эвакуационные носилки (4 помощника)

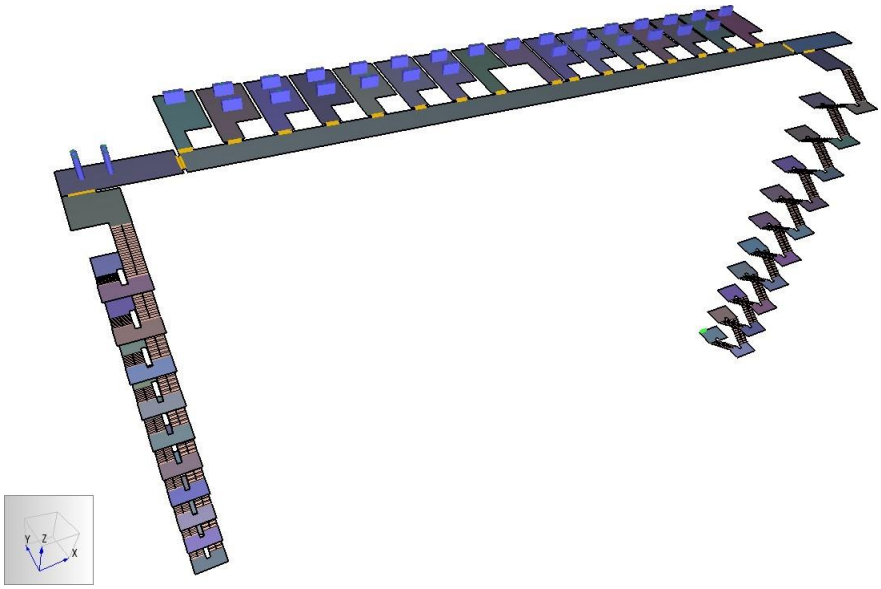


Рисунок 107. Симуляция эвакуации носилок из больницы Гента с четырьмя членами эвакуационной команды.

В таблице 5 приведены данные по скорости для пациентов и ассистентов.

Таблица 5. Скорости, использованные при моделировании эвакуации

Роль	Горизонтальная (м/с)	Лестница вниз (м/с)	Лестница вверх (м/с)	Начальная задержка (с)
Носилки (мужская команда)	1.09±0.08	0.63	Н/Д	67.6
Кресло для эвакуации (женская команда)	1.39±0.03	0.82	Н/Д	35.9
Помощники (женщины и мужчины)	1.385±0.055	0.885±0.125	0,655±0,015	0.0

5.1.5.3. Результаты для эвакуации одного пациента

Прежде чем перейти к полной симуляции эвакуации, мы сначала смоделируем эвакуацию одного пациента, либо в эвакуационном кресле, либо на носилках. Это позволит нам сравнить результат с ручными расчетами.

Первый случай - одно эвакуационное кресло и одна женщина-помощник. В таблице 6 сравниваются результаты для ручного расчета и Pathfinder (в режиме управления и на основе номинальных скоростей, указанных выше, и расстояния в модели). Ручные расчеты не учитывают никаких факторов, таких как задержка при открывании двери, скорость прохождения поворотов или усталость. Расчеты Pathfinder включают задержки и дополнительные движения из-за поворотов и, как следствие, являются более медленными, чем расчеты вручную. Для режима SFPE при расчете скорости движения по лестнице используется коэффициент скорости движения по лестнице SFPE.

Таблица 6. Рассчитанные вручную расстояния и время движения эвакуационного кресла.

Этап эвакуации	Режим рулевого управления			Режим SFPE		
	Скорость (м/с)	Расстояние	Время (с)	Скорость (м/с)	Расстояние	Время (с),
Ассистент до пациента	1.385	25.9	18.7	1.385	25.9	18.7
Подготовка		0.0	35.9		0.0	35.9
Пациент до лестницы	1.390	34.5	24.8	1.390	34.5	24.8
Пациент спускается по 20 пролетам лестницы	0.820	76.4	93.1	1.070	76.4	71.4
Пациент по 20 площадкам	1.390	46.0	33.1	1.390	46.0	33.1
Пациент на нижней площадке	1.390	2.4	1.7	1.390	2.4	1.7
Ассистент на нижней площадке	1.385	2.4	1.8	1.385	2.4	1.8
Помощник поднимается по лестнице на 20 пролетов	0.655	76.4	116.6	1.070	76.4	71.4
Помощник на 20 площадках	1.385	43.8	31.6	1.385	43.8	31.6

Ассистент возвращается к началу	1.385	7.9	5.7	1.385	7.9	5.7
Ручной расчет одиночного прохода итоги:		315.6	363.0		315.6	296.1
Pathfinder:			407.37			302.11

Второй случай - одни носилки с четырьмя мужчинами-ассистентами. И снова мы сравниваем ручные расчеты с Pathfinder, таблица 7. Как и раньше, расчеты Pathfinder выполняются медленнее, чем расчеты вручную. В этом случае возникают дополнительные трудности при маневрировании носилок через двери и на лестничных площадках. Для режима SFPE при расчете скорости движения по лестнице используется коэффициент скорости движения по лестнице SFPE.

Таблица 7. Рассчитанные вручную расстояния и время движения носилок.

Этап эвакуации	Режим рулевого управления			Режим SFPE		
	Скорость (м/с)	Расстояние	Время (с)	Скорость (м/с)	Расстояние	Время (с),
Ассистент до пациента	1.385	25.9	18.7	1.385	25.9	18.7
Подготовка		0.0	67.6		0.0	67.6
Пациент до лестницы	1.090	34.5	31.7	1.090	34.5	31.7
Пациент спускается по 20 пролетам лестницы	0.630	76.4	121.2	0.840	76.4	90.9
Пациент по 20 площадкам	1.090	46.0	42.2	1.090	46.0	42.2
Пациент на нижней площадке	1.090	2.4	1.8	1.385	2.4	1.8
Ассистент на нижней площадке	1.385	2.4	1.8	1.385	2.4	1.8
Помощник поднимается по лестнице на 20 пролетов	0.655	76.4	116.6	1.070	76.4	71.4

Помощник на 20 площадках	1.385	43.8	31.6	1.385	43.8	31.6
Ассистент возвращается к началу	1.385	7.9	5.7	1.385	7.9	5.7
Ручной расчет одиночного прохода итоги:		315.7	439.3		315.7	363.7
Pathfinder:			534.4			457.63

5.1.5.4. Результаты для Эвакуация с этажа

Для эвакуации всех людей этажа использовались два сценария:

1. Женская команда дневной смены использует эвакуационные кресла
2. Мужская бригада ночной смены использует носилки.

В больнице команда дневной смены состоит из семи ассистентов. Подготовка к эвакуации с использованием эвакуационного кресла требует двух ассистентов, но во время движения кресла требуется только один ассистент. Чтобы представить это, при моделировании эвакуационного кресла предполагалось, что один ассистент всегда занят подготовкой пациентов, а в движении эвакуации участвуют только шесть ассистентов. Для ночной смены есть только четыре ассистента, и для каждых носилок требуется четыре ассистента во время эвакуации.

В таблице 8 приведены результаты расчетов. Ручной расчет основывался на расчетах, приведенных в табл. 6 и табл. 7.

Таблица 8. Сводка результатов эвакуации. Результаты эвакуации приведены по данным Хант и др. Хант, Галеа и Лоуренс 2013.

	Управляемое движение		Режим SFPE		Pathfinder Steering+SFPE (час)	Exodus (час)
Моделирование	Pathfinder (час)	Расчет вручную (час)	Pathfinder (час)	Расчет вручную (час)		
Эвакуационное кресло, женская команда, 6 ассистентов	0.53	0.46	0.39	0.38	0.54	0,6
Носилки, мужская команда, 4 ассистенты	4.17	3.37	3.61	2.80	4.27	3,8

5.1.5.5. Анализ

Результаты соответствуют ручным расчетам, но все расчеты Pathfinder немного длиннее, чем ручные расчеты. Результаты SFPE короче, чем результаты управляемого движения главным образом потому, что при расчете скорости движения по лестнице вниз и вверх используются более быстрые коэффициенты скорости движения по лестнице SFPE. Результаты также схожи с результатами расчета Exodus.

5.2. Скорость потока от источника агентов

Здесь проверяется скорость потока для источника агентов. Источники можно использовать для введения новых агентов в модель.

5.2.1. Введение

Источники могут быть назначены на: прямоугольную область, помещения и двери (внутренние и выходные).

Исходные параметры включают: скорость потока (постоянную или периодическую), распределение профилей, поведение людей, а также возможность либо отложить ввод людей в переполненное помещение, либо использовать принудительную скорость потока (даже если это приведет к наложению людей друг на друга).

5.2.2. Примечания по настройке

Модель показана на рисунке 108. Были протестированы четыре типа источников:

прямоугольник, дверь, выходная дверь и комната. Агенты были равномерно распределены между двумя профилями (красным и синим). Скорость потока источника постоянна и составляет 2,5 перс/с. Была выбрана опция принудительного потока.

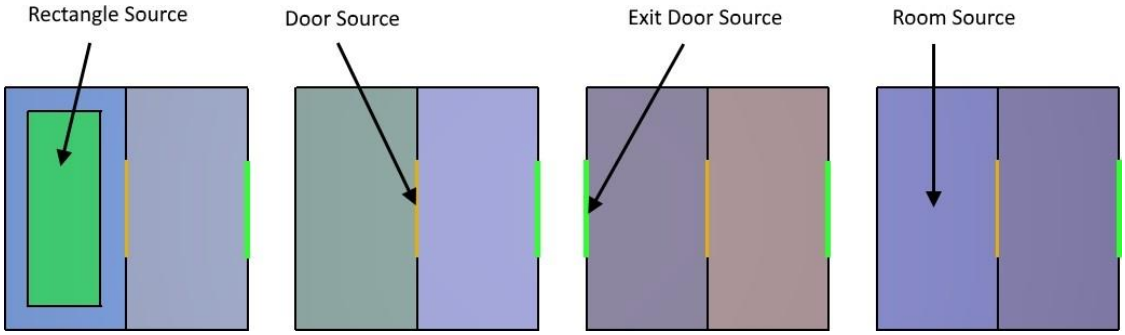


Рисунок 108. Модель, используемая для тестирования источников обитателей.

5.2.3. Результаты

На рисунке 109 показаны скорости потока через выходную дверь для четырех случаев. Во всех случаях поток достигает установившегося значения 2,5 перс/с. Результаты для управляемого движения (на рисунке), SFPE и Steering+ SFPE аналогичны.

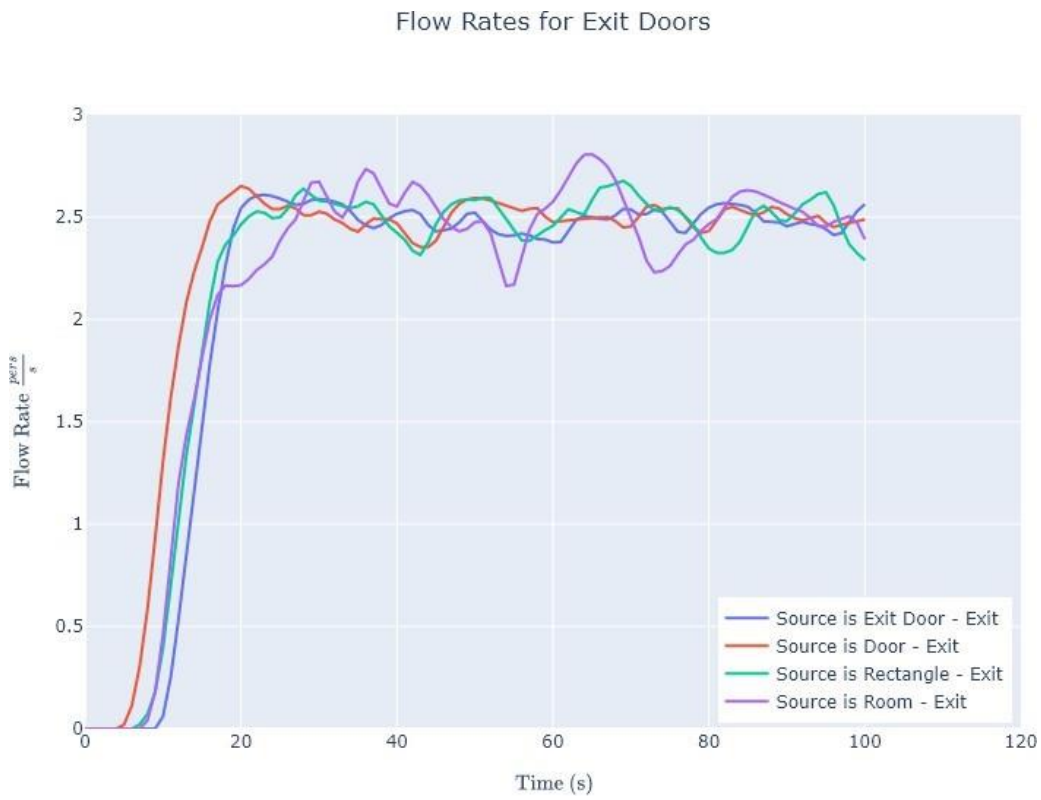


Рисунок 109. Расход через выходную дверь для различных типов источников.

5.2.4. Анализ

Расчеты Pathfinder оправдали ожидания.

5.3. Расчет дробной эффективной дозы FED

Для расчета дробной эффективной дозы в Pathfinder (FED) используются уравнения, описанные в SFPE Handbook of Fire Protection Engineering, стр. 23082428. (SFPE 2016).

5.3.1. Введение

Реализация такая же, как и в FDS+EVAC (Korhonen 2018), с использованием только концентраций удушливых газов CO, CO2 и O2 для расчета значения FED.

FEDtot= FEDCO× VCO2+ FEDO2

В этот расчет не входит эффект цианистого водорода (HCN), а эффект CO2 обусловлен только гипервентиляцией.

Более подробную информацию см. в руководстве пользователя Pathfinder и техническом справочном руководстве.

5.3.2. Неподвижный агент

5.3.2.1. Примечания по настройке

В этой задаче проверки проверяется расчет FED для неподвижного агента. Модель PyroSim показана на рисунке 110. Модель включает в себя пожар и устройства, которые измеряют

объемные доли CO, CO2 и O2 в месте расположения высоты агента. Модель также использует FDS для расчета FED, который сравнивается с расчетом Pathfinder.

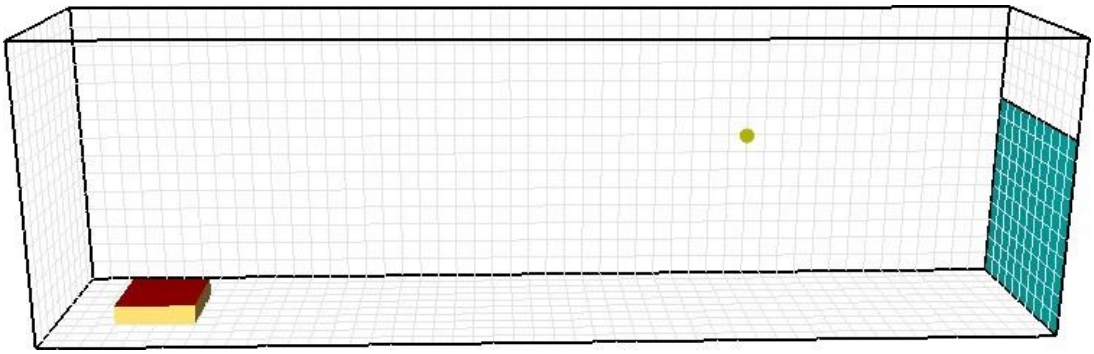


Рисунок 110. Модель PyroSim для расчета FED с использованием неподвижного агента.

Модель Pathfinder показана на рисунке 111. Pathfinder выбирает количество FED на высоте 90% от высоты агента. Высота по умолчанию составляет 1,8288 м, поэтому в модели PyroSim устройства расположены на высоте 1,6459 м.

Рисунок 111. Модель Pathfinder для расчета FED с использованием неподвижного Агента.

5.3.2.2. Результаты

Сравнение выходных данных устройства FDS с входными данными Pathfinder и рассчитанным

FED показано на Рисунке 112, Рисунке 113, Рисунке 114 и Рисунке 115. Pathfinder считывает данные 3D Plot, а затем интерполирует, поэтому существует некоторая разница между устройствами и интерполированные значения для CO2, CO и O2.

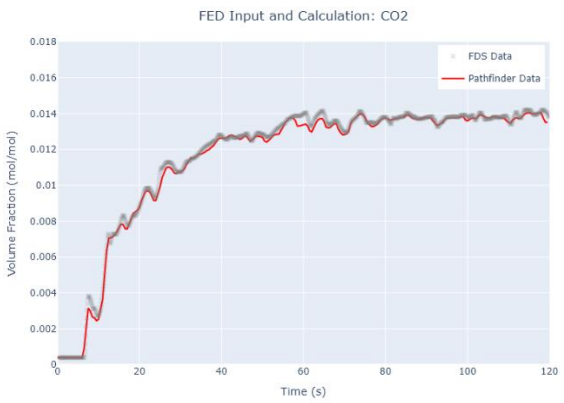


Рисунок 112. Выход устройства FDS в сравнении с входом Pathfinder: CO2

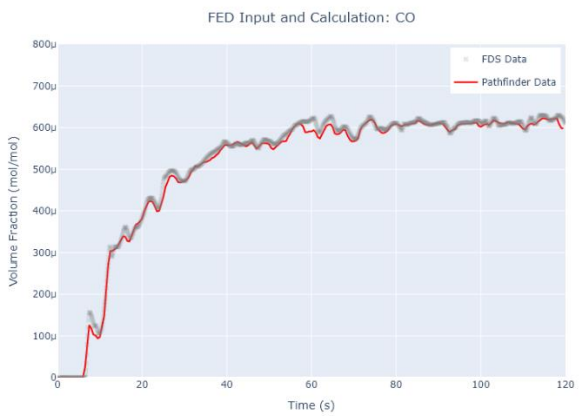


Рисунок 113. Выход устройства FDS в сравнении с входом Pathfinder: CO

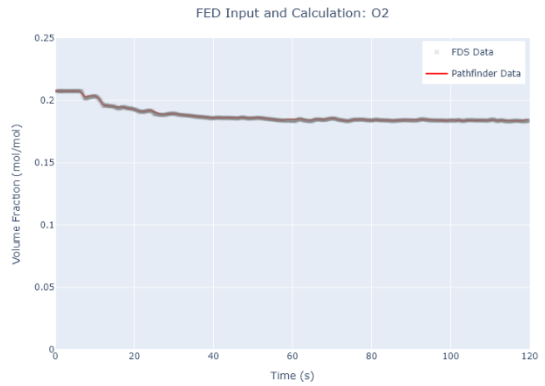


Рисунок 114. Выход устройства FDS в сравнении с входом Pathfinder: O2

Рисунок 115. Выход устройства FDS в сравнении с входом Pathfinder: FED

5.3.2.3. Анализ

Как уже отмечалось, данные 3D Plot, полученные с помощью FDS, несколько отличаются от данных датчиков. Кроме того, данные 3D Plot были выведены с временным интервалом 0,5 секунды, поэтому интеграция по времени FED приводит к некоторому расхождению со значением прибора FDS, интегрированным с более мелким шагом по времени. Итоговые значения FED=0,0467 для FDS и FED=0,0455 для Pathfinder (3% разницы).

Результаты Pathfinder удовлетворительны.

5.3.3. Движущийся агент

5.3.3.1. Примечания по настройке

В этой задаче проверки проверяется расчет FED для движущегося агента. Модель PyroSim показана на рисунке 116. Модель разделена на три области начальных значений (INIT), разделенные тонкостенными преградами.

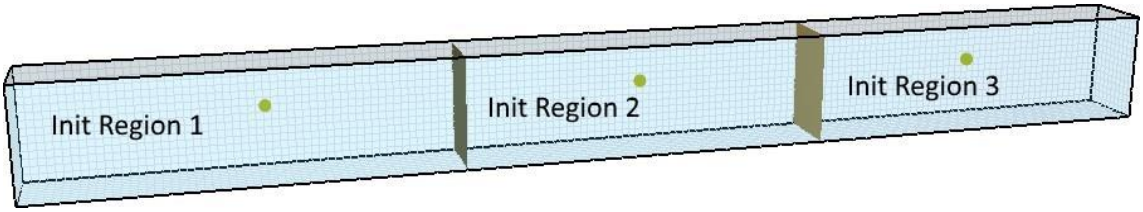


Рисунок 116. Модель PyroSim для расчета FED для движущегося агента.

В начальных областях использовалась смесь воздуха и продуктов сгорания. Массовые доли газов в двух смесях приведены в таблице 9. В области 1 массовая доля продуктов сгорания составляет 100%, в области 2 - 75% продуктов сгорания и 25% воздуха, а в области 3 - 50% продуктов сгорания и 50% воздуха.

Таблица 9. Виды в газовых смесях.

Газ	Продукты сгорания	Воздух
Диоксид углерода	0.010000	0.000592
Окись углерода	0.001000	0.000000
Азот	0.839000	0.763018
Кислород	0.150000	0.231164
Водяной пар	0.000000	0.005226

Модель Pathfinder показана на рисунке 117. Агент стартует слева и имеет скорость 0,25 м/с. Расстояние до выхода составляет 30 м, поэтому время до выхода - примерно 120 секунд (в начале есть некоторое время на ускорение). По мере того, как агент перемещается по модели, он подвергается воздействию различных газовых смесей.

Рисунок 117. Модель Pathfinder для расчета FED с использованием движущегося агента.

5.3.3.2. Результаты

Сравнение выходных данных устройства FDS с входными данными Pathfinder и рассчитанным FED показано на Рисунке 118, Рисунке 119, Рисунке 120 и Рисунке 121. Данные показывают, как человек подвергается воздействию различных концентраций по мере перемещения через модель.

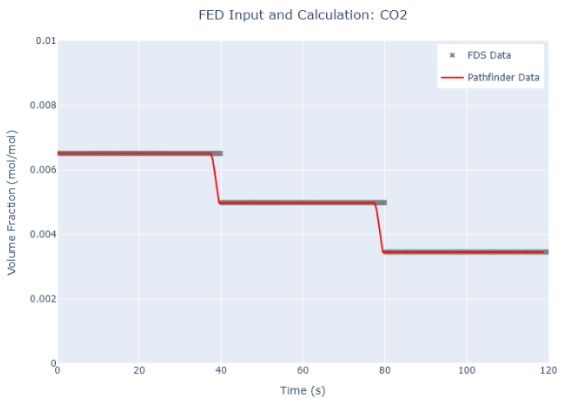


Рисунок 118. Выход устройства FDS в сравнении с входом Pathfinder: CO2

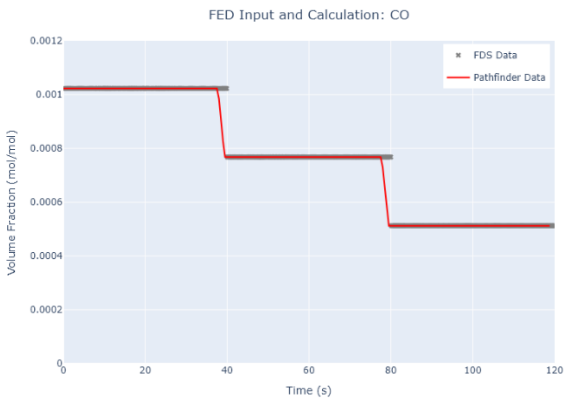


Рисунок 119. Выход устройства FDS в сравнении с входом Pathfinder: CO

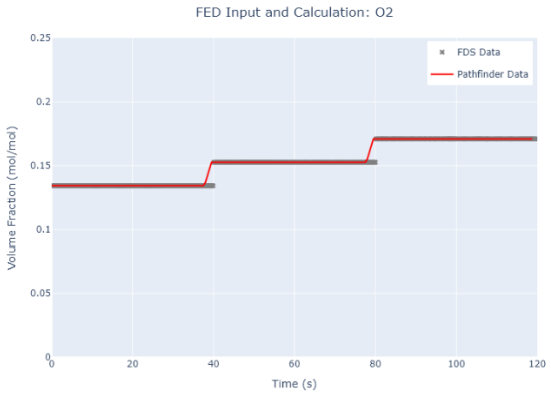


Рисунок 120. Выход устройства FDS в сравнении с входом Pathfinder: O2

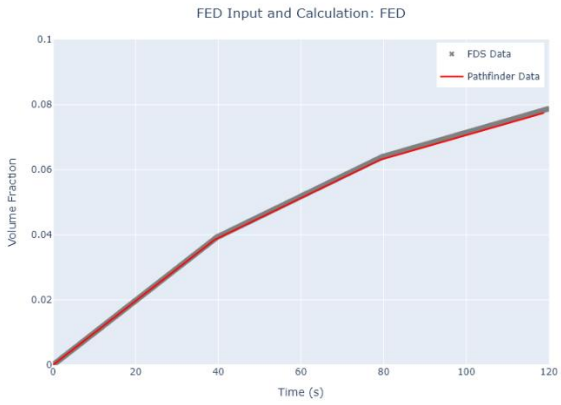


Рисунок 121. Выход устройства FDS в сравнении с входом Pathfinder: FED

5.3.3.3. Анализ

Для этого моделирования концентрация постоянна в каждой начальной области. Мы можем рассчитать ожидаемый FED вручную, он составляет 0,07896. Pathfinder рассчитывает 0,07745, разница составляет 1,9 %. Как видно на рисунке 121, интерполяция Pathfinder данных 3D Plot приводит к сглаживанию данных на границах областей.

Результаты Pathfinder удовлетворительны.

5.4. Снижение скорости движения из-за дыма

5.4.1. Введение

Чтобы воспользоваться этой функцией, необходимо сначала запустить симуляцию PyroSim, которая выдает данные о видимости PLOT 3D SOOT. Затем эти данные о видимости импортируются в Pathfinder и преобразуются в коэффициент экстинкции с использованием коэффициента видимости C=3. Данные извлекаются для каждого агента в его местоположении X, Y и высоте Z, составляющей 90 % от роста агента. В этом тесте используется настройка Fridolf et al. для параметра расширенного профиля "Скорость в дыму".

Более подробную информацию см. в руководстве пользователя Pathfinder.

5.4.2. Примечания по настройке

В этой задаче проверки проверяется снижение скорости движения людей при перемещении через различные зоны видимости. Модель PyroSim состоит из отдельных областей, в которых массовая доля сажи определяется для видимости 0,5 м, 1,0 м, 2,0 м, 3,0 м, 4,0 м, 5,0 м и∞ м.

Модель Pathfinder показана на рисунке 122. Каждая комната имеет равномерную видимость, которая обусловлена плотностью сажи.

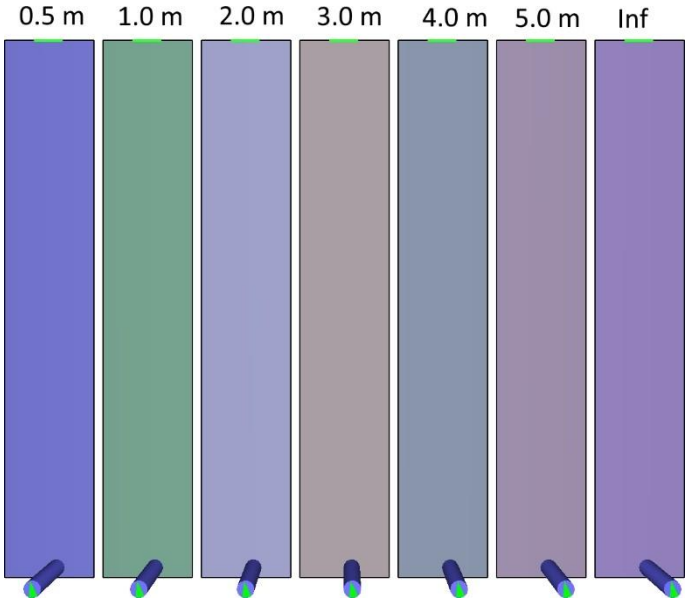


Рисунок 122. Модель Pathfinder для расчета скорости в дыму. Значения указывают на видимость в различных помещениях.

5.4.3. Результаты

Сравнение расчетной и ожидаемой скоростей показано на рисунке 123.

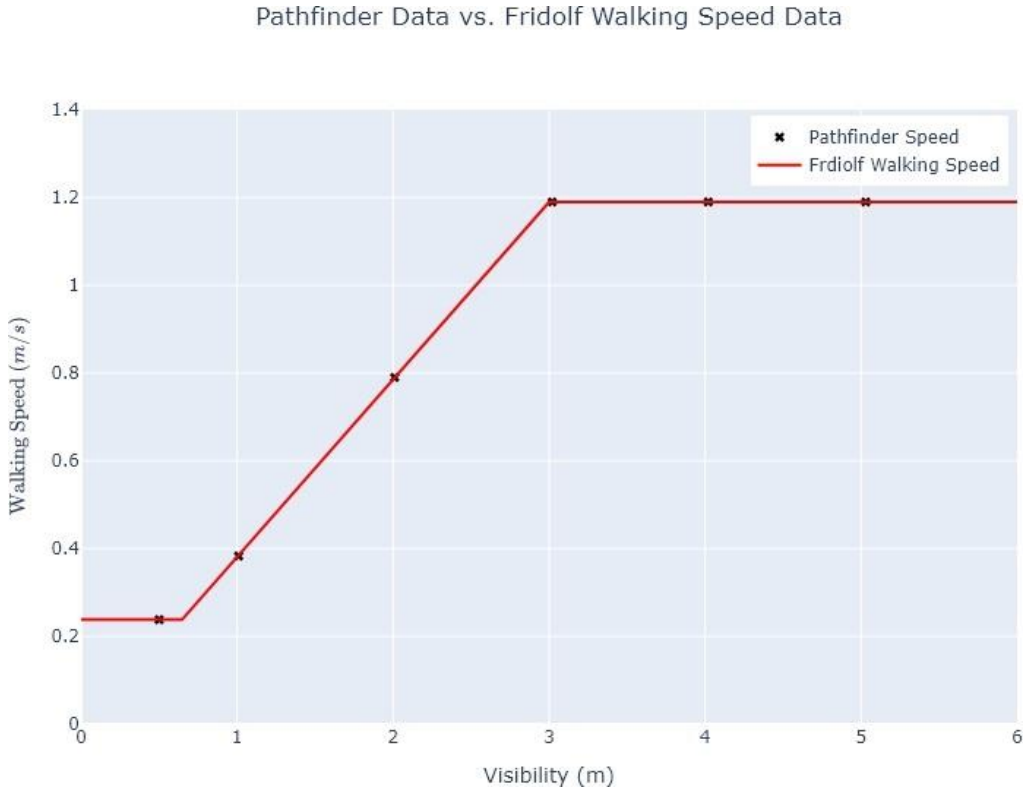


Рисунок 123. Сравнение ожидаемой и расчетной скоростей в дыму.

5.4.4. Анализ

Скорости в дыму, рассчитанные Pathfinder, рассчитаны правильно. Результаты работы Pathfinder удовлетворительны.

5.5. Социальное дистанцирование

Этот тестовый пример проверяет способность агентов реалистично поддерживать заданную социальную дистанцию. Модель представляет собой комнату размером 10 мх10 м с дверью шириной 1 м с северной стороны, которая изначально закрыта. 8 равномерно распределенных агентов будут ждать и собираться возле двери, пока она закрыта, а затем в момент t=10 с, когда дверь откроется, начнут выходить из комнаты. Представленные данные будут взяты между 2 с и 20 с времени моделирования, поскольку за пределами этого времени обитатели находятся на таком расстоянии, что выходят за пределы максимального диапазона для определения ближайшего обитателя.

5.5.1. Ожидаемые результаты

Ожидается, что агенты будут соблюдать среднее минимальное расстояние между ними ±15% от заданного социального расстояния на протяжении большей части моделирования. Этот диапазон учитывает отклонения, которые можно ожидать в реальных сценариях социального дистанцирования (т.е. не каждый человек будет постоянно поддерживать идеальную социальную дистанцию).

5.5.2. Результаты

Как видно на рисунке 124, на протяжении большей части моделирования агенты сохраняли среднюю социальную дистанцию в пределах указанного диапазона. Наибольшие изменения наблюдались в начале моделирования, когда агенты подходили и толпились возле двери, ожидая ее открытия, и после открытия двери, когда агенты начали выходить через дверь, а оставшиеся подошли ближе к двери и заняли освободившееся пространство, чтобы выйти самим.

Рисунок 125 дает хорошее визуальное представление о том, как выглядят эти заграждения. Агенты показаны в виде 3D-моделей с дисками радиусом 1 м вокруг агентов.

Рисунок 124. Результаты теста на социальное дистанцирование

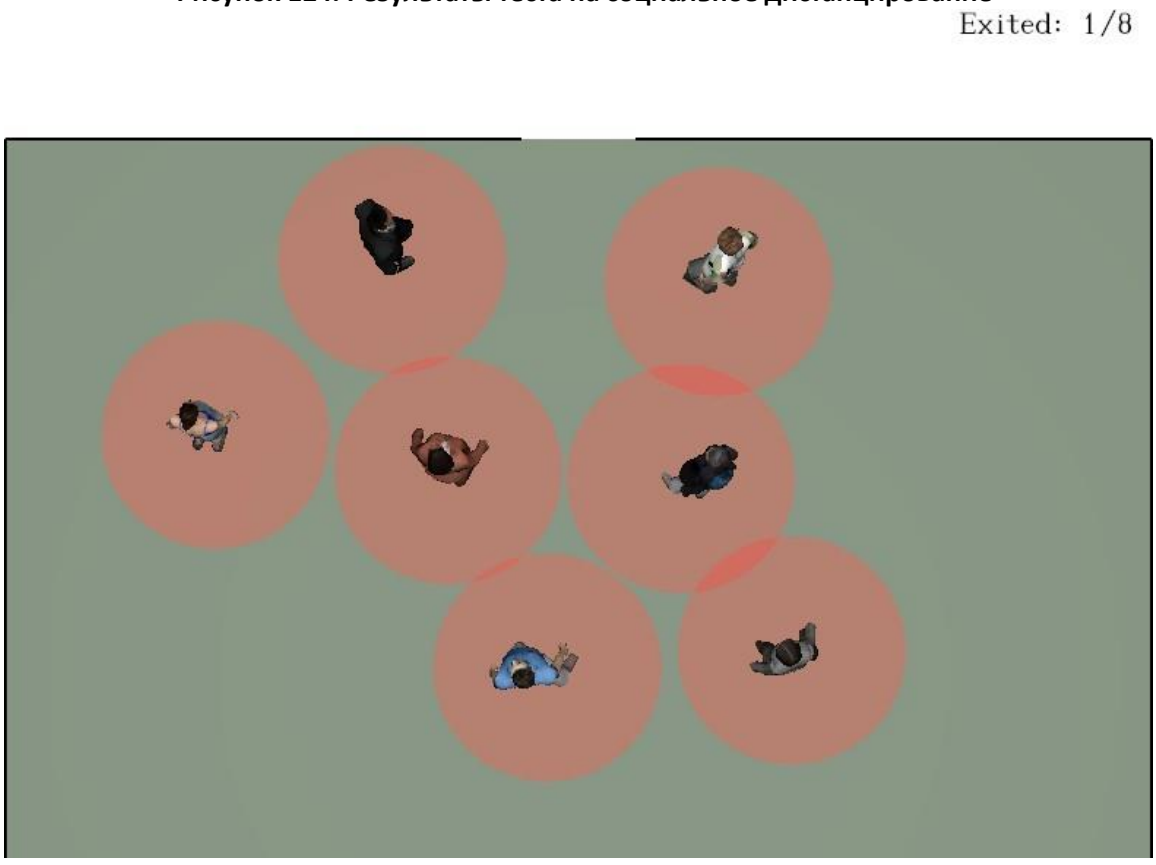


Рисунок 125. Снимок экрана с изображением агентов при t=11 с с дисками радиусом 1 м вокруг агентов

6. Испытания IMO

В этом разделе представлены тестовые примеры, описанные в Приложении 3 к IMO 1533 (IMO 2016).

6.1. Скорость передвижения (IMO_01)

В данном тестовом примере проверяется скорость движения в коридоре одного агента. Тест основан на тесте 1, приведенном в Приложении 3 к IMO 1533 (IMO 2016). В испытательном примере описывается коридор шириной 2 метра и длиной 40 метров, в котором находится один человек. Человек должен пройти по коридору и выйти. Скорость движения составляет 1,0 м/с.

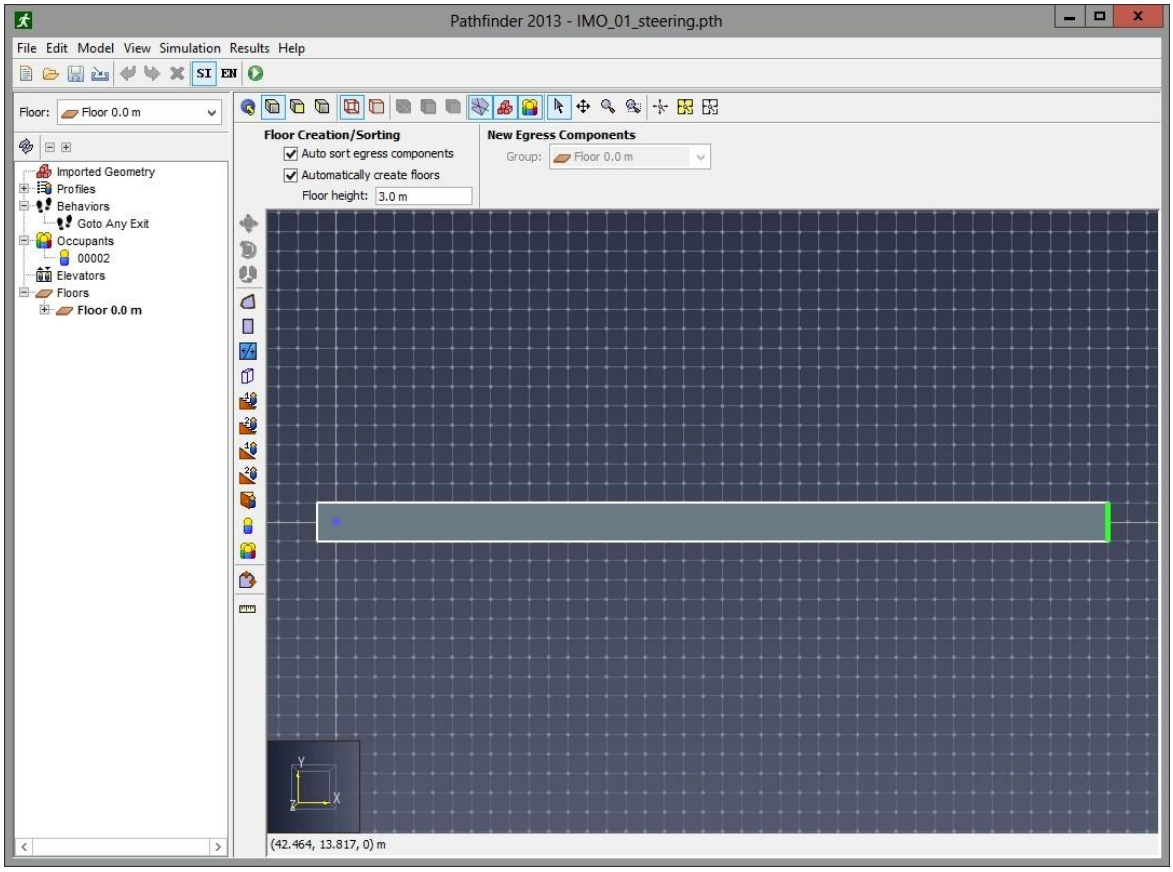


Рисунок 126. Настройка проблемы IMO_01.

6.1.1. Примечания по настройке

Поскольку Pathfinder отслеживает местоположение агента по центральной точке, навигационная сетка была расширена на 0,5 метра позади агента, чтобы обеспечить пространство для задней половины агента, стоящего ровно в 40 метрах от выхода.

6.1.2. Ожидаемые результаты

В режиме SFPE время выхода должно составлять 40,0 секунд.

Режим рулевого управления использует инерцию, и нам нужно учесть время, необходимое для разгона до 1,0 м/с. Агенты в Pathfinder могут разогнаться до максимальной скорости за 1,1 с. Из d1= 0,5∗ (v1− v0)∗ t1 мы знаем, что при v0= 0,0 м/с, v1=

1,0 м/с, к моменту t=1,1 с Агент пройдет 0,55 м. Оставшееся время при скорости 1,0 м/с будет пройдено 39,45 м. Таким образом, рулевой режим должен дать время выхода 40,55 секунды.

6.1.3. Результаты

В таблице 10 показано время выхода в каждом из протестированных режимов.

Таблица 10. Результаты IMO_01

Режим	Время
Рулевое управление	40.55
Рулевое управление+ SFPE	40.55
SFPE	40.02

6.1.4. Анализ

Все испытания прошли успешно.

6.2. Скорость движения по лестнице вверх (IMO_02)

Это испытание проверяет скорость движения по лестнице для одного агента. Пример испытания основан на испытании 2, приведенном в Приложении 3 к IMO 1533 (IMO 2016). В испытательном примере описывается лестница шириной 2 метра и длиной 10 метров (по наклону). Один агент с максимальной скоростью ходьбы 1,0 м/с начинает движение у основания лестницы и поднимается к выходу. В данном примере используются ступени размером 7"x11".

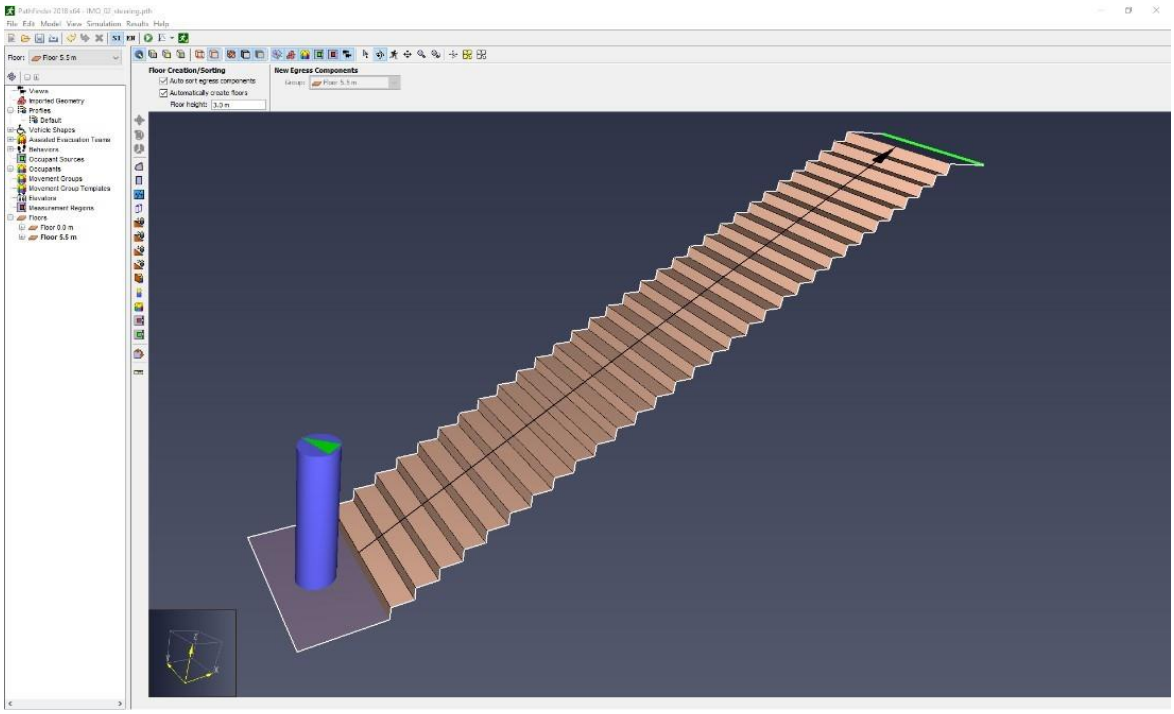


Рисунок 127. Настройка задачи IMO_02.

6.2.1. Примечания по настройке

Агент располагался на нижней площадке на расстоянии 1,0 м от лестницы. Для режима рулевого управления это позволяет агенту пройти достаточное расстояние, чтобы разогнаться до полной скорости, прежде чем он достигнет лестницы. В сводном файле Pathfinder сообщается время входа первого человека на лестницу и время выхода последнего человека, поэтому это позволяет точно определить время пребывания на лестнице для одного человека.

6.2.2. Ожидаемые результаты

Для агента задается базовая максимальная скорость 1,0 м/с. По умолчанию в Pathfinder используются коэффициенты скорости лестниц SFPE. Это снижение скорости будет использоваться во всех режимах с коэффициентом масштабирования, основанным на уклоне лестничного марша. Используя уравнения скорости, представленные в Техническом справочнике Pathfinder, этот масштабный коэффициент будет равен (0,918 м/с) / (1,19 м/с)= 0,77. Таким образом, эффективная скорость движения человека по лестнице составляет (1,0 м/с)*0,77= 0,77 м/с. Исходя из этой скорости, результаты для всех режимов должны быть одинаковыми - 12,99 с.

6.2.3. Результаты

В таблице 11 показано время подъема по лестнице в каждом режиме (т.е. время выхода из лестницы минус время входа в лестницу).

Таблица 11. Результаты IMO_02

Режим	Время
Рулевое управление	12.92
Рулевое управление+ SFPE	13.02
SFPE	12.95

6.2.4. Анализ

Все результаты испытаний находятся в пределах допустимой погрешности.

6.3. Скорость движения по лестнице вниз (IMO_03)

Данный пример испытания проверяет скорость спуска по лестнице для одного агента. Тест основан на испытании 3, приведенном в Приложении 3 к IMO 1533 (IMO 2016). В испытательном примере описывается лестница шириной 2 метра и длиной 10 метров (по уклону). Один человек с максимальной скоростью ходьбы 1,0 м/с начинает движение с верхней части лестницы и спускается к выходу. В данном примере используются ступени размером 7"x11".

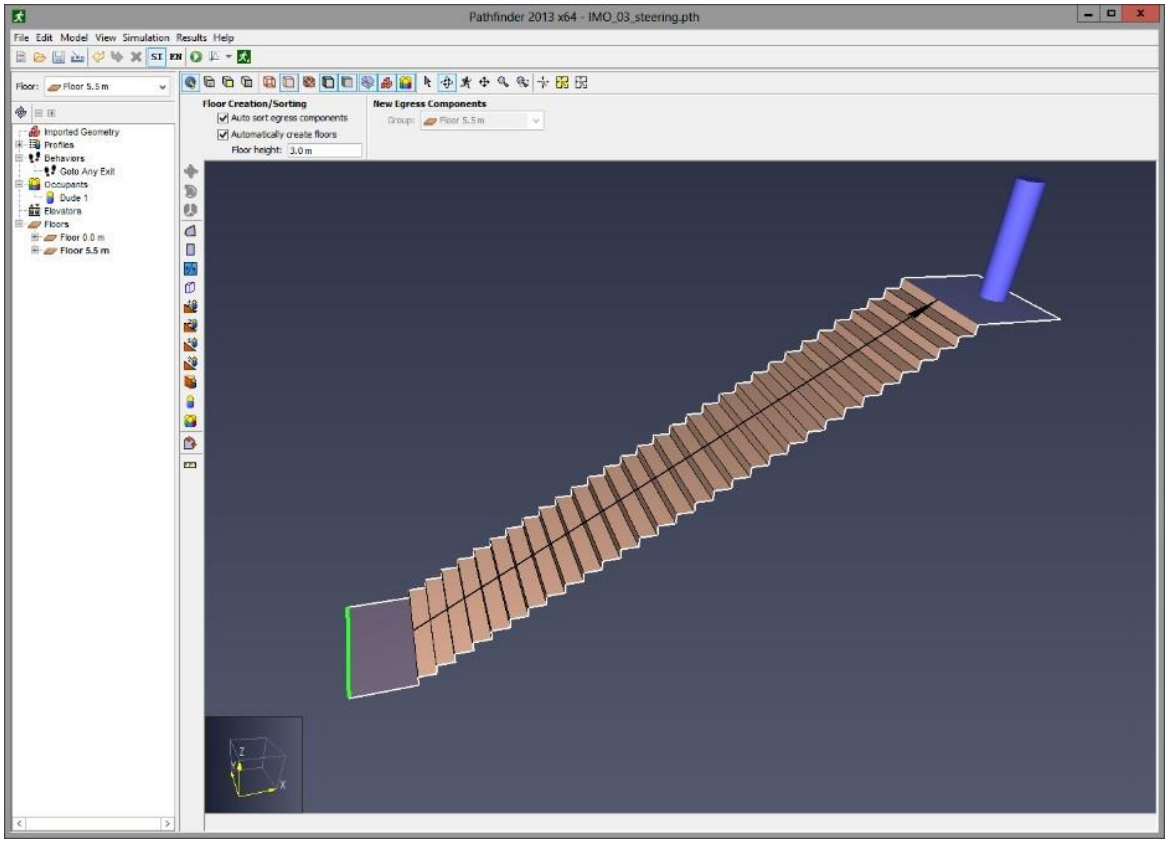


Рисунок 128. Постановка задачи IMO_03.

6.3.1. Примечания по настройке

Человек находился на верхней площадке на расстоянии 1,0 м от лестницы. Для режима рулевого управления это позволяет агенту пройти достаточное расстояние, чтобы разогнаться до полной скорости, прежде чем он достигнет лестницы. Длина между центральным исходным положением агента и нижней частью лестницы составляет чуть менее 10,0 м, поскольку на вершине лестницы агент должен учесть допуск на дверь.

6.3.2. Ожидаемые результаты

Для агента задается базовая максимальная скорость 1,0 м/с. По умолчанию в Pathfinder используются коэффициенты скорости лестниц SFPE. Это снижение скорости будет использоваться во всех режимах с коэффициентом масштабирования, основанным на уклоне лестничного марша. Используя уравнения скорости, представленные в Техническом справочнике Pathfinder, этот масштабный коэффициент будет равен (0,918 м/с) / (1,19 м/с)= 0,77. Таким образом, эффективная скорость человека на лестнице составляет (1,0 м/с) * 0,77= 0,77 м/с.

Исходя из этой скорости, результаты для всех режимов должны быть одинаковыми - 12,99 с.

6.3.3. Результаты

В таблице 12 показано время спуска по лестнице в каждом из испытанных режимов (т.е. время спуска по лестнице минус время подъема по лестнице).

Таблица 12. Результаты IMO_03

Режим	Время
Рулевое управление	12.92
Рулевое управление+ SFPE	12.98
SFPE	12.94

6.3.4. Анализ

Все результаты испытаний находятся в пределах допустимой погрешности.

6.4. Скорость потока через двери (IMO_04)

В этом случае проверяются ограничения скорости потока, накладываемые дверными проемами в режимах SFPE. Результаты, полученные в режиме рулевого управления, включены для сравнения. Испытание основано на испытании 4, приведенном в приложении 3 к IMO 1533 (IMO 2016). В тестовом примере описывается комната размером 8 м на 5 м с выходом 1 м, расположенным по центру 5метровой стены. В комнате находится 100 человек, при этом ожидается, что средняя скорость потока через дверь за весь период не превысит 1,33 человека в секунду.

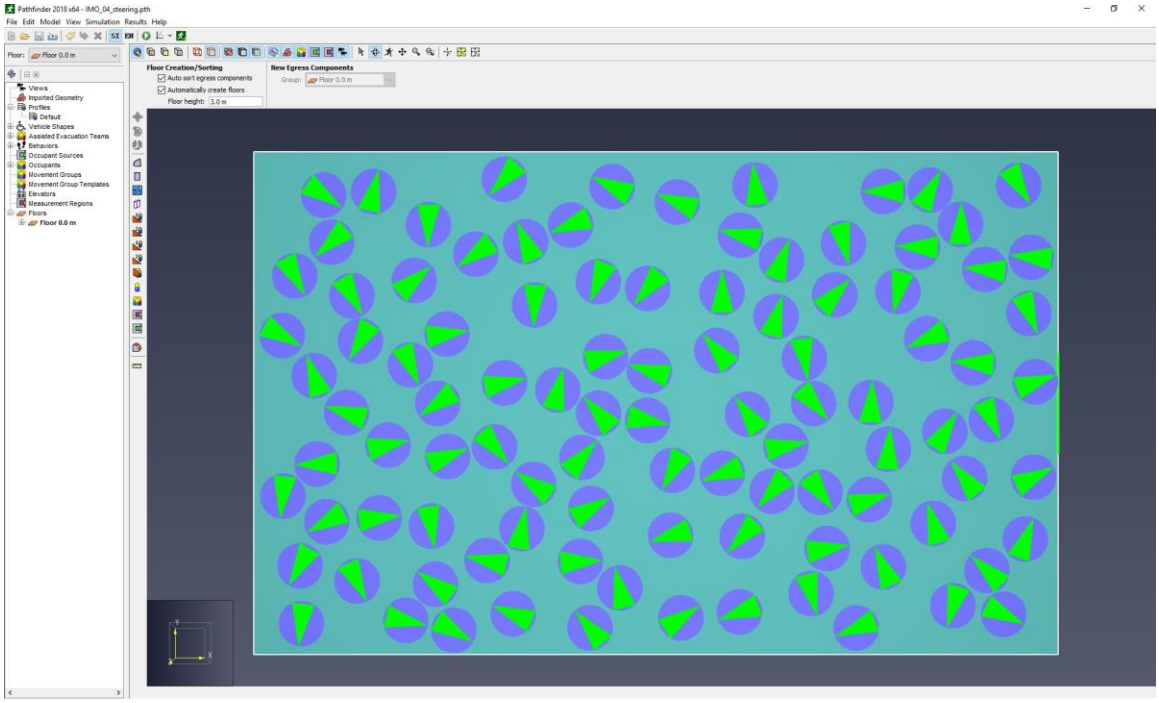


Рисунок 129. Настройка проблемы IMO_04.

6.4.1. Примечания по настройке

Скорость потока измеряется с помощью сводных данных моделирования. Средняя скорость потока определяется как количество людей, прошедших через дверь, деленное на количество времени, в течение которого дверь была "активна". Дверь считается

активной после того, как первый посетитель достиг двери, и перестает быть активной, когда последний посетитель покидает дверь.

В соответствии с рекомендациями SFPE пограничный слой для всех режимов составлял 15 см. При таком пограничном слое ожидаемая скорость потока через дверь для режима SFPE составляет 0,92 перс/с.

6.4.2. Ожидаемые результаты

Максимальная наблюдаемая скорость потока не должна превышать 1,33 человека в секунду.

6.4.3. Результаты

В таблице 13 приведены средние значения расхода через выходную дверь, наблюдаемые в каждом из испытанных режимов.

Таблица 13. Результаты IMO_04

Режим	Скорость потока (чел/с)
Рулевое управление	1.02
Рулевое управление+ SFPE	0.82
SFPE	0.93

6.4.4. Анализ

Режим Steering+ SFPE показывает более медленную скорость потока через выходную дверь, что обусловлено сочетанием рулевого движения и ограничений скорости потока через дверь. Все результаты испытаний находятся в пределах допустимой погрешности.

6.5. Время начальной задержки (IMO_05)

В данном примере проверяется начальное время задержки (до начала движения). Тест основан на тесте 5, приведенном в Приложении 3 к IMO 1533 (IMO 2016). В тестовом примере описывается комната размером 8 м на 5 м с выходом 1 м, расположенным по центру 5-метровой стены. В комнате находятся 10 человек с равномерно распределенным временем начала движения от 10 до 100 секунд. На рисунке 130 показана исходная постановка задачи. 10 человек были добавлены в комнату в случайных местах.

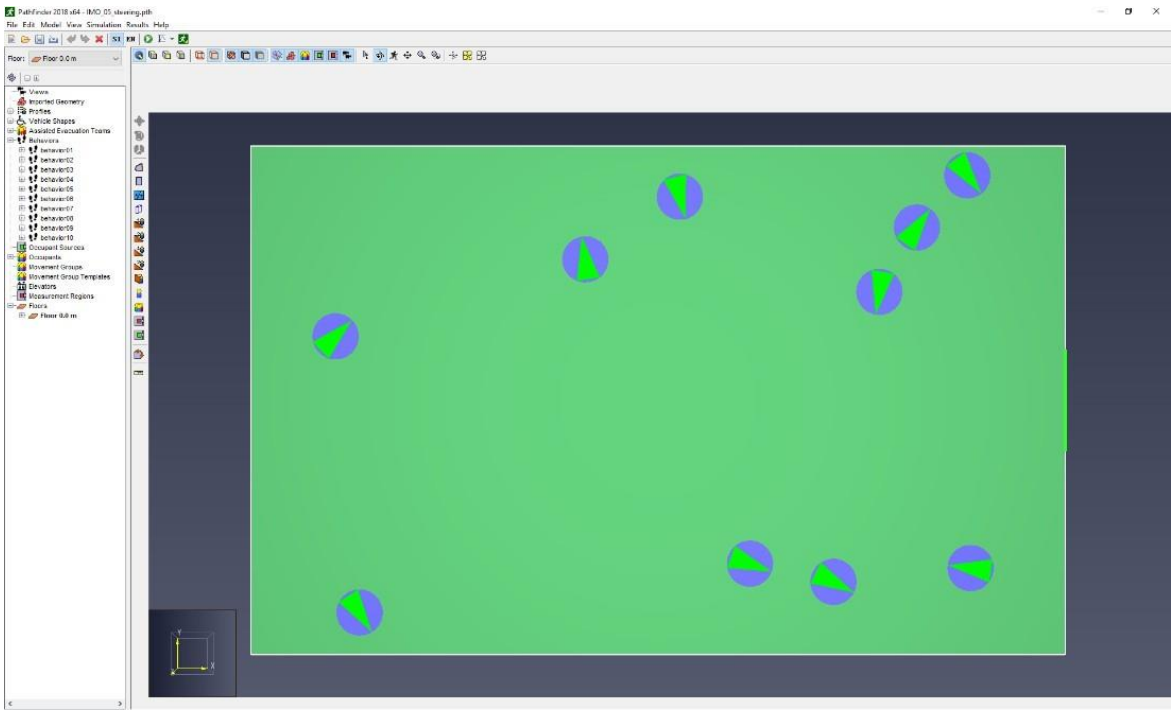


Рисунок 130. Постановка задачи для первоначальной проверки времени движения.

6.5.1. Примечания по настройке

Агентам были назначены начальные задержки от минимальной= 10,0 с до максимальной= 100,0 с.

Параметры агентов не были рандомизированы между симуляциями. Это должно привести к схожим графикам количества людей.

6.5.2. Ожидаемые результаты

Начальное время движения должно быть разным для разных людей. В этом можно убедиться, просмотрев анимацию результатов. В Pathfinder также есть возможность выводить подробные файлы с разделителями-запятыми для каждого агента.

6.5.3. Результаты

Результаты для этой задачи сначала были проверены с помощью анимации. Результаты также были проверены путем изучения выходных данных в подробных выходных данных для каждого агента.

6.5.4. Анализ

Все режимы симулятора прошли проверку.

6.6. Огибание углов (IMO_06)

Тест основан на тесте 6, приведенном в приложении 3 к IMO 1533 (IMO 2016). В тестовом примере описывается, как 20 агентов преодолевают угол в коридоре шириной 2 метра. Ожидаемый результат заключается в том, что агенты огибают угол без проникновения в какую-либо геометрию модели.

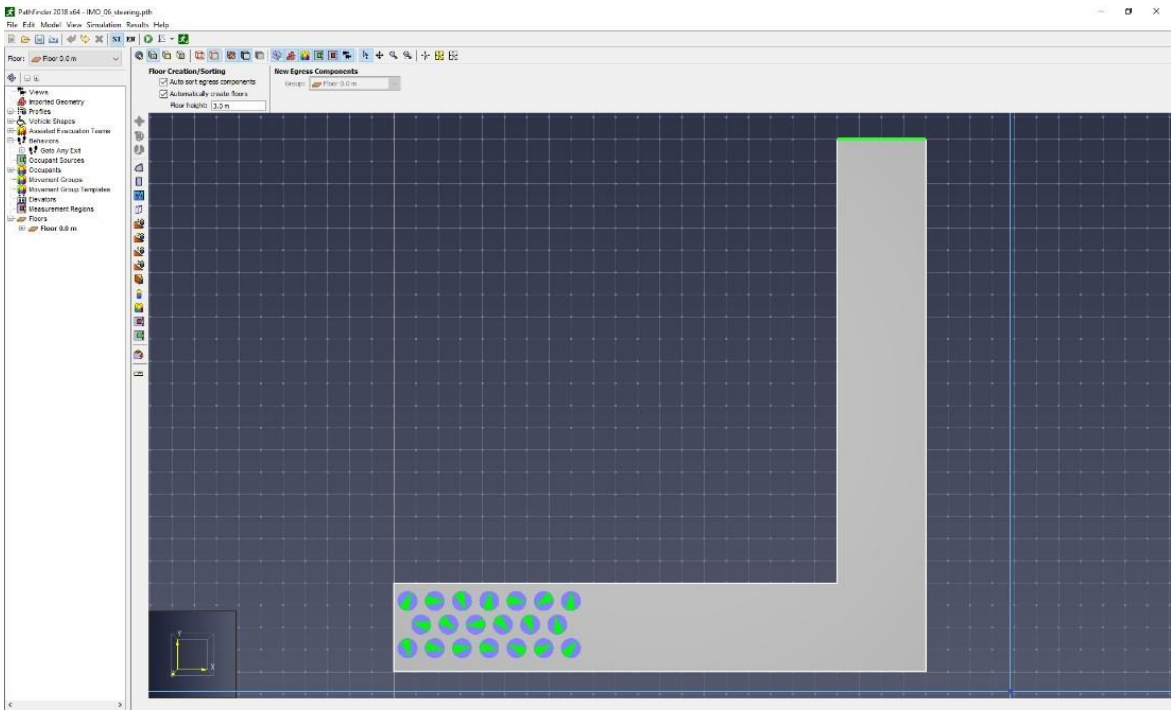


Рисунок 131. Настройка проблемы IMO_06

6.6.1. Примечания по настройке

20 человек равномерно распределяются в первых 4 метрах коридора.

6.6.2. Ожидаемые результаты

Каждый участник должен перемещаться по модели, оставаясь в ее границах. В режимах рулевого управления агенты сохраняют разделительное расстояние, но режим SFPE позволяет нескольким агентам находиться в одном пространстве.

6.6.3. Результаты

На Рисунке 132, Рисунке 133 и Рисунке 134 показаны траектории движения агентов для всех трех режимов симулятора. Эти траектории движения можно использовать для проверки того, что все агенты успешно преодолели угол.

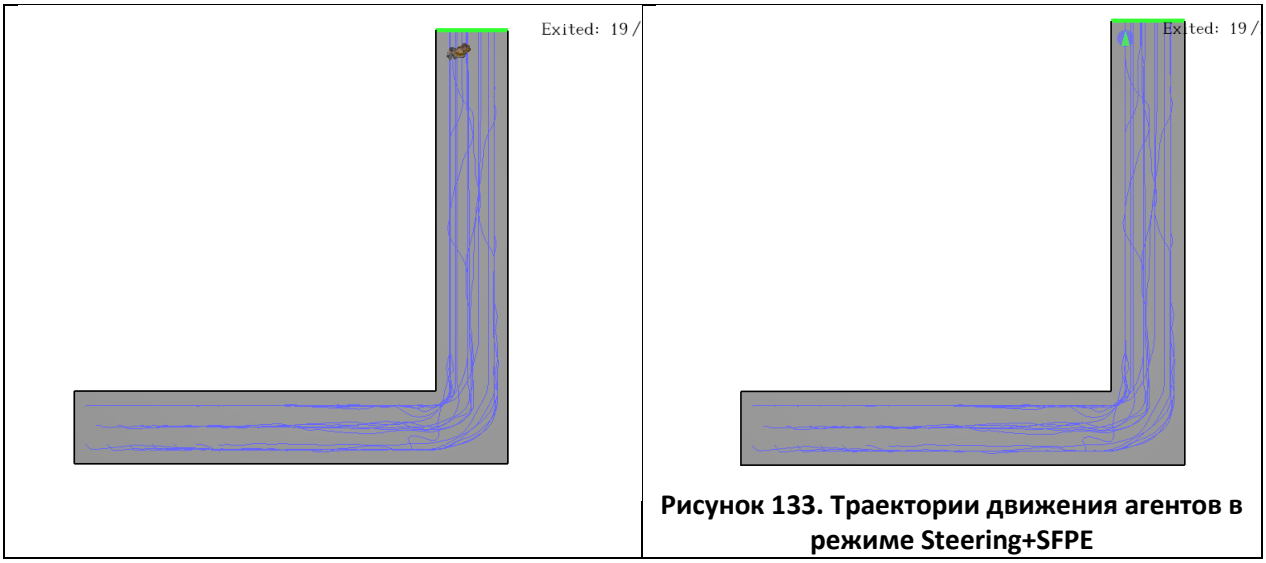


Рисунок 133. Траектории движения агентов в режиме Steering+SFPE

Рисунок 132. Траектории движения агентов в режиме управляемого движения

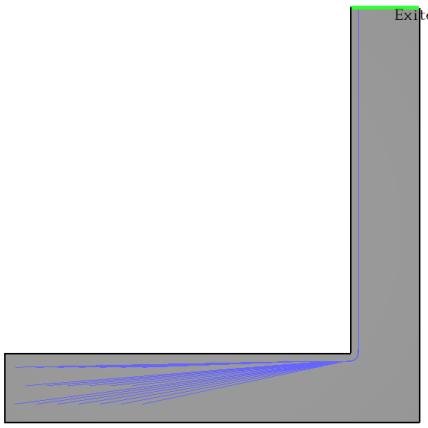


Рисунок 133. Траектории движения агентов в режиме SFPE

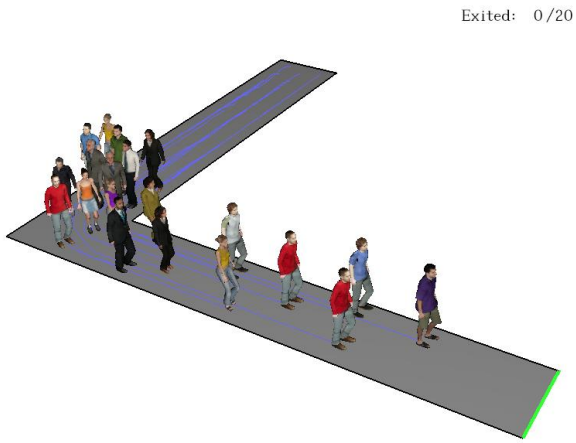


Рисунок 135. Более реалистичный вид агентов для анализа рулевого движения (на 15 секунде)

6.6.4. Анализ

Следы агентов показывают, что ни в одном из трех режимов моделирования ни один агент не вышел за границы моделирования. Все режимы моделирования успешно прошли проверку. Режим SFPE - это, по сути, расчет потока, поэтому агенты могут быть наложены друг на друга в одном пространстве. Режим рулевого управления обеспечивает наиболее реалистичное движение.

Все режимы симулятора прошли проверку.

6.7. Несколько скоростей движения (IMO_07)

Этот тест проверяет несколько скоростей движения в Pathfinder. Тест основан на тесте 7, приведенном в приложении 3 к IMO 1533 (IMO 2016). Тест включает в себя назначение демографических данных для группы агентов.

6.7.1. Примечания по настройке

Профиль скорости ходьбы, представляющий мужчин 30-50 лет, распределен между 50 агентами. Скорость ходьбы представляет собой равномерное случайное распределение с минимальным значением 0,97 м/с и максимальным значением 1,62 м/с. Информация для этого профиля взята из таблицы 3.4 в приложении к Временному руководству по расширенному анализу эвакуации новых и существующих судов.

Люди расположились на одной линии в 0,5 м от левой стороны комнаты размером 40,5 x 51,0 м. Выходная дверь находится на противоположной стороне комнаты. Каждый человек движется с заданной скоростью по прямой вправо.

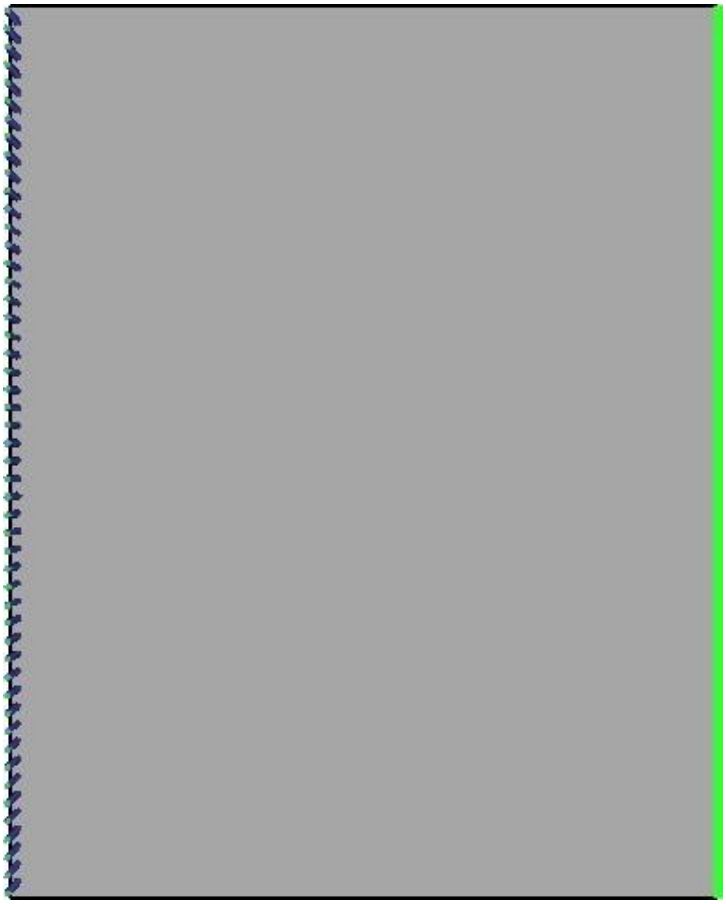


Рисунок 136. Настройка теста IMO_07

6.7.2. Ожидаемые результаты

Агенты должны демонстрировать различную скорость ходьбы в указанных пределах, так что время прибытия к правому краю комнаты должно находиться между 24,7 с и 41,2 с (пренебрегая инерцией в режиме рулевого управления).

6.7.3. Результаты

Скорость движения агентов, наблюдаемая в ходе моделирования, находилась в заданных пределах. Время первого и последнего прибытия на выход приведено в таблице ниже. На рис. 137 показаны траектории движения агентов через 20 с для режима рулевого управления (другие случаи аналогичны).

Таблица 14. Таблица, показывающая время первого и последнего прибытия для всех трех режимов

Режим	Выход первого (с)	Выход последнего (с)
Рулевое управление	25.35	41.92
Рулевое управление+ SFPE	25.35	41.92
SFPE	24.82	40.95

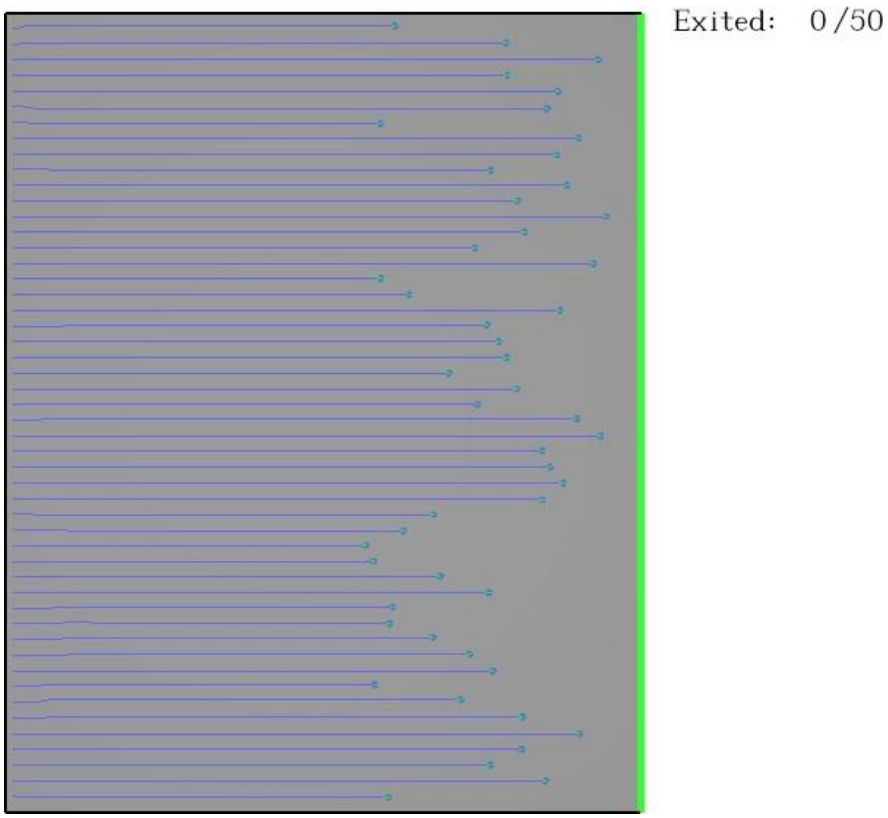


Рисунок 137. Результаты IMO_07, показывающие траектории движения людей через 20 с

6.7.4. Анализ

Все режимы прошли проверку.

6.8. Противоток (IMO_08)

Это испытание проверяет способность Pathfinder работать с противотоком. Тест основан на тесте 8, приведенном в Приложении 3 к IMO 1533 (IMO 2016). Испытание включает в себя взаимодействие людей в противотоке. Две комнаты площадью 10 метров квадратных соединены в центре коридором длиной 10 метров и шириной 2 метра. 100 человек распределяются на дальней стороне одной комнаты как можно плотнее и перемещаются по коридору в другую комнату. Обитатели другой комнаты движутся в противоположном направлении. Тест проводится с 0, 10, 50 и 100 агентами, движущимися в противотоке с исходной группой.

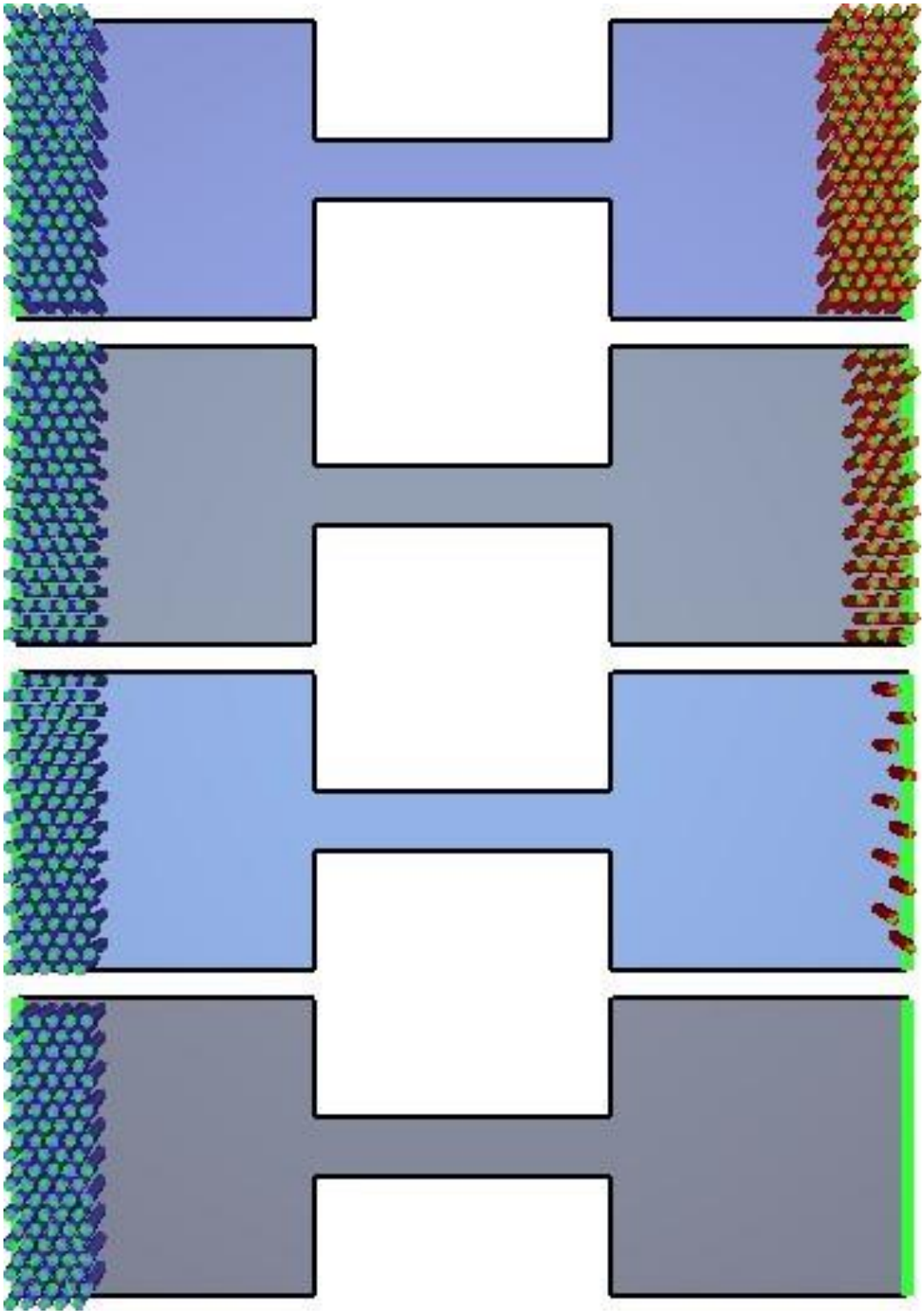


Рисунок 138. Задача IMO_08, содержащая все четыре конфигурации и двери на входах в коридоры

6.8.1. Примечания по настройке

Геометрия задачи задана, как описано выше, с выходами у дальних стен. Обитателям каждой комнаты назначается выход в противоположной комнате.

Чтобы упростить сбор результатов, все четыре сценария моделирования создаются в одной модели. Этого можно добиться, продублировав исходную геометрию 3 раза, а затем используя разное количество агентов в комнате справа.

Профиль скорости ходьбы, представляющий мужчин в возрасте 30-50 лет, распределен между всеми агентами. Скорость ходьбы представляет собой равномерное случайное распределение с минимальным значением 0,97 м/с и максимальным значением 1,62 м/с. Информация для этого профиля взята из таблицы 3.4 в приложении к Временному руководству по расширенному анализу эвакуации новых и существующих судов.

6.8.2. Ожидаемые результаты

При увеличении количества людей, находящихся в противотоке, движение будет замедляться и время эвакуации увеличиваться.

Поскольку в режиме SFPE нет ограничений на нахождение людей в одном пространстве, встречный поток не замедляет движение (плотность людей в помещении в этом случае снижает скорость ходьбы).

6.8.3. Результаты

На рис. 139 показаны положения агентов в режиме рулевого управления для случая противотока из 100 человек за 75 с.

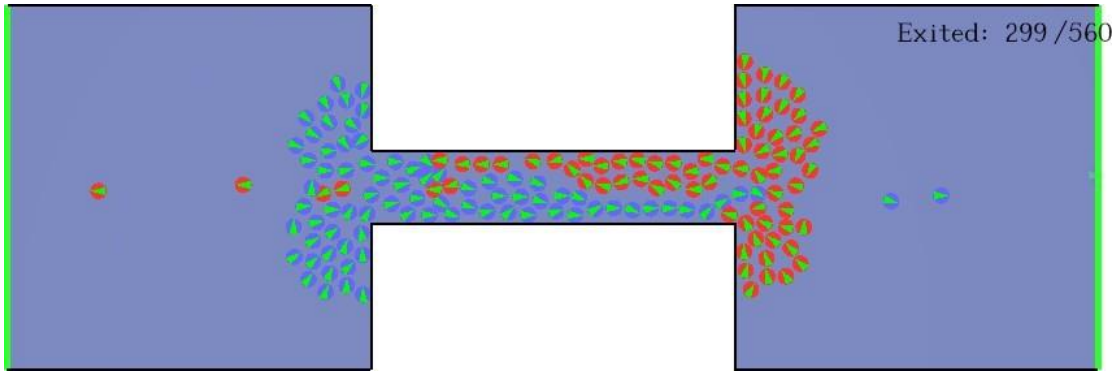


Рисунок 139. Положение агентов в режиме рулевого управления, 100 человек в противотоке при 75 с

В таблице 15 показано время, которое требуется агентам, начинающим движение слева, чтобы выйти из симуляции справа. Время приведено в зависимости от количества людей, находящихся в противотоке.

Таблица 15. Таблица, показывающая время выхода агентов

	Количество агентов, находящихся с правой стороны			
	0	10	50	100
Режим	Время выхода вправо (с)			
Рулевое управление	66.28	79.8	160.2	218.88
Рулевое управление+SFPE	66.25	79.8	160.2	218.88
SFPE	29.95	30.68	31.45	33.2

6.8.4. Анализ

В каждом режиме большее количество встречных потоков увеличивает время эвакуации. В режиме SFPE не учитываются помехи от встречного потока, увеличение времени происходит из-за повышенной плотности в помещении.

Сравнение с экспериментальными данными для двунаправленного потока см. в разделе 2.2.

Все режимы прошли испытания.

6.9. Чувствительность к доступным дверям (IMO_09)

Это испытание проверяет чувствительность системы Pathfinder к изменению количества доступных дверей. Тест основан на тесте 9, приведенном в Приложении 3 к IMO 1533 (IMO 2016). Испытание включает эвакуацию 1000 человек из большого помещения размером 30 м на 20 м с дверями шириной 1,0 м. 1000 человек равномерно распределены в центре комнаты на расстоянии 2 м от каждой стены. Тест проводится с 4 выходами и 2 выходами, при этом ожидается, что время эвакуации удвоится в случае с 2 выходами.

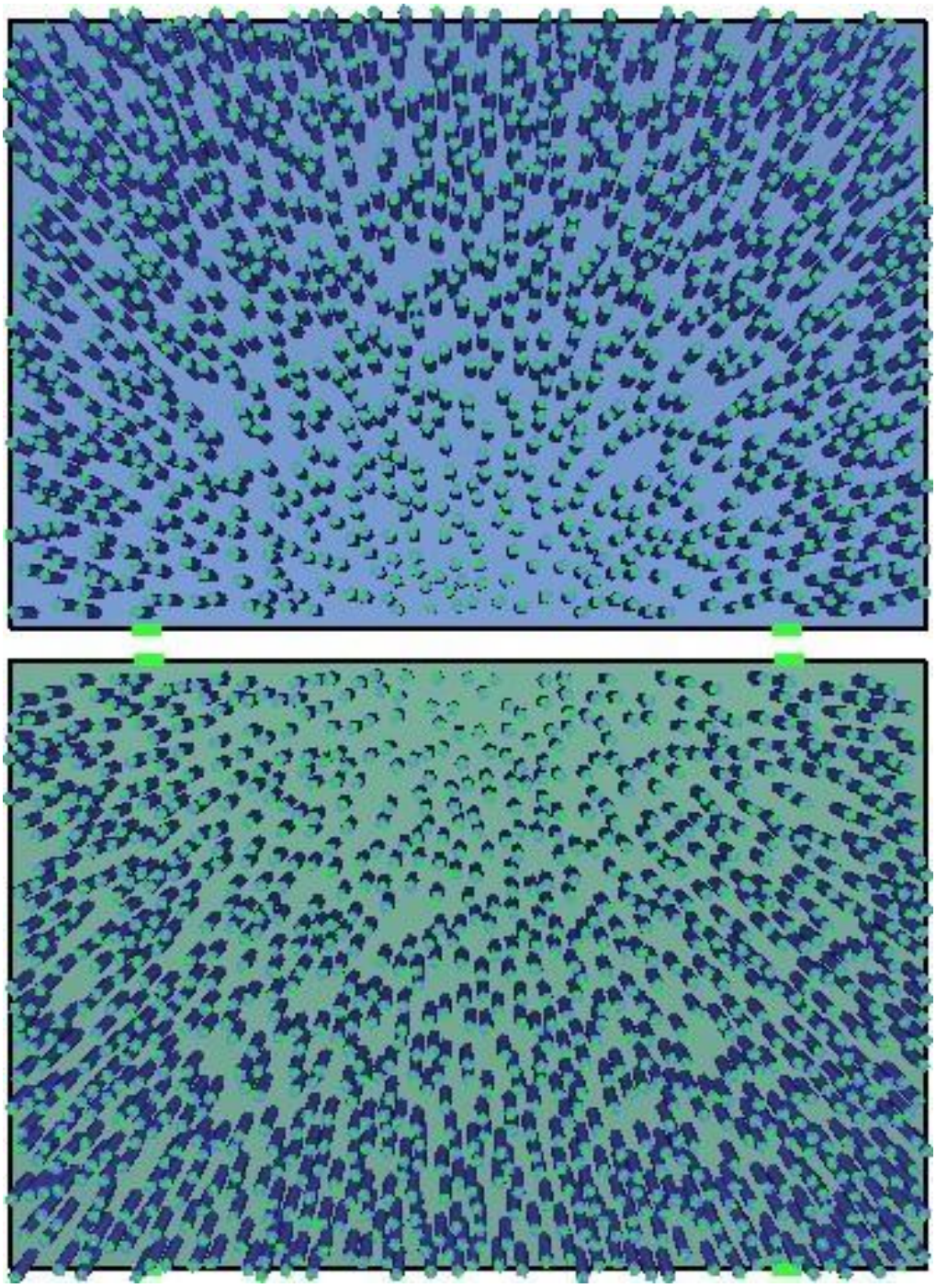


Рисунок 140. Задача IMO_09, содержащая обе конфигурации

6.9.1. Примечания по настройке

Агенты получили профиль, соответствующий мужчинам 30-50 лет, из таблицы 3.4 в приложении к IMO 1238 (IMO 2016). Скорость ходьбы представляет собой равномерное случайное распределение с минимальным значением 0,97 м/с и максимальным значением 1,62 м/с.

Для упрощения сбора данных обе конфигурации модели добавлены в одну имитационную модель.

6.9.2. Ожидаемые результаты

Время моделирования должно увеличиться примерно вдвое при использовании вдвое меньшего количества дверей.

Для режима SFPE ожидаемая скорость потока через одну дверь составляет 0,924 перс/с (15 см граничный слой), что дает время эвакуации 541 с для двух дверей и 271 с для четырех дверей.

6.9.3. Результаты

В таблице 16 показано время, необходимое для выхода из симуляции для обоих случаев. Поскольку начальные места расположения агентов были назначены случайным образом, количество людей, выходящих из каждой двери, не совсем одинаково.

Таблица 16. Таблица, показывающая время выхода для всех трех режимов.

Модель	4 двери		2 двери	
	Мин (с)	Макс (с)	Мин (с)	Макс (с)
Рулевое управление	202.45	208.57	403.75	405.52
Рулевое управление+SFPE	282.32	294.10	573.11	584.88
SFPE	264.77	275.60	540.68	549.33

6.9.4. Анализ

Для всех режимов время моделирования, хотя и не удваивается, находится в пределах допустимой погрешности.

Все режимы прошли испытания.

6.10. Назначение выходов (IMO_10)

Этот тест проверяет назначение выходов в Pathfinder. Тест основан на тесте 10, приведенном в Приложении 3 к IMO 1533 (IMO 2016). 23 человека размещаются в ряде помещений, представляющих собой каюты корабля, и назначают конкретные выходы.

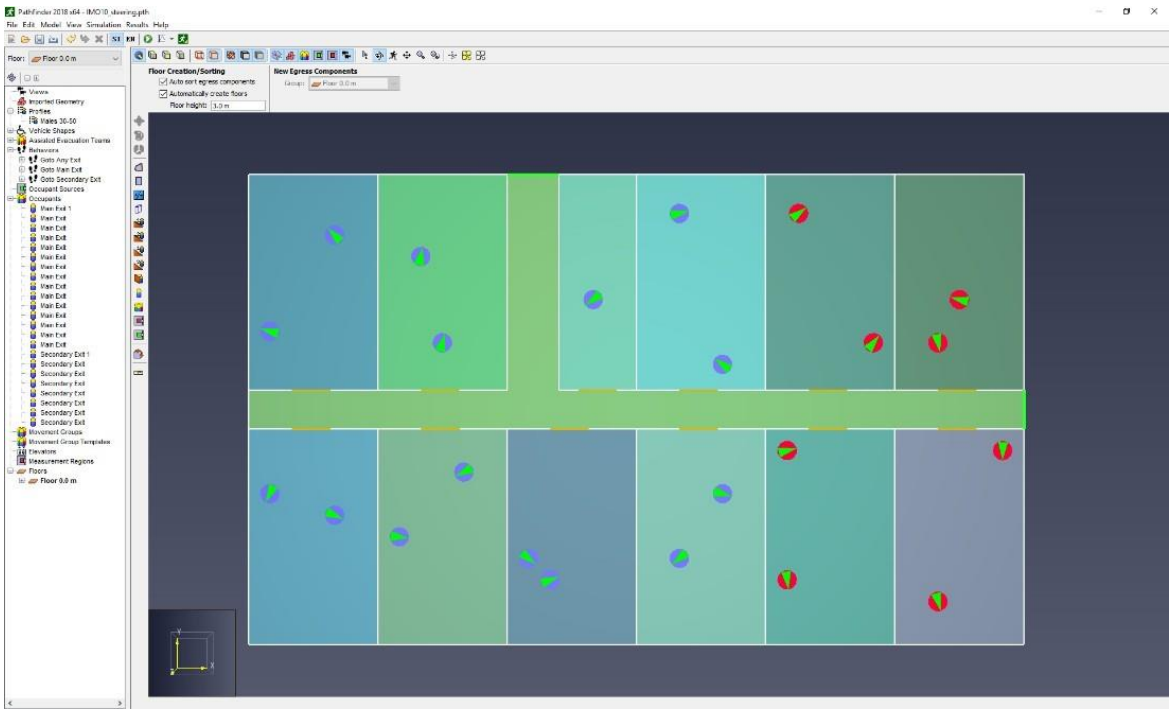


Рисунок 141. Настройка проблемы IMO_10

6.10.1. Примечания по настройке

Жильцы 8 комнат слева направляются к главному (верхнему) выходу. Жильцы оставшихся 4 комнат направляются к второстепенному (правому) выходу. Обитатели получают профиль, соответствующий мужчинам 30-50 лет из таблицы 3.4 в приложении к IMO 1238 (IMO 2016). Скорость ходьбы представляет собой равномерное случайное распределение с минимальным значением 0,97 м/с и максимальным значением 1,62 м/с.

6.10.2. Ожидаемые результаты

Каждый человек должен покинуть модель через указанный выход.

6.10.3. Результаты

На рисунке 142 показаны пути, пройденные агентами в режиме рулевого управления (другие режимы были аналогичными). Пути четырех агентов, которые должны были воспользоваться запасным выходом, показаны красным цветом, все остальные пути агентов показаны синим цветом.

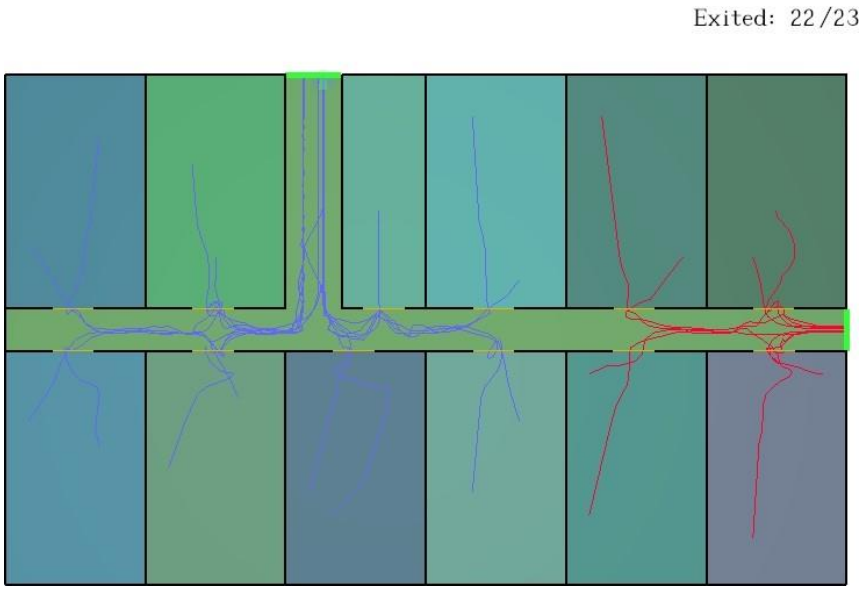


Рисунок 142. Траектория движения агентов в режиме рулевого управления

6.10.4. Анализ

Результаты для всех режимов симулятора показывают, что четыре человека, которым было предписано покинуть помещение через запасной выход, сделали это.

Все режимы прошли испытания.

6.11. Скопления (IMO_11)

В этом тесте рассматривается образование заторов в Pathfinder. Тест основан на тесте 11, приведенном в Приложении 3 к IMO 1533 (IMO 2016). 150 человек должны переместиться из комнаты размером 5 x 8 в коридор размером 2 x 12 м, подняться по лестнице и выйти из симуляции через платформу шириной 2 м. Ожидается, что скопление людей образуется сначала у входа в коридор, а затем у основания лестницы.

На рисунке 143 показана постановка задачи в Pathfinder. Красный прямоугольник обозначает область, используемую для измерения плотности.

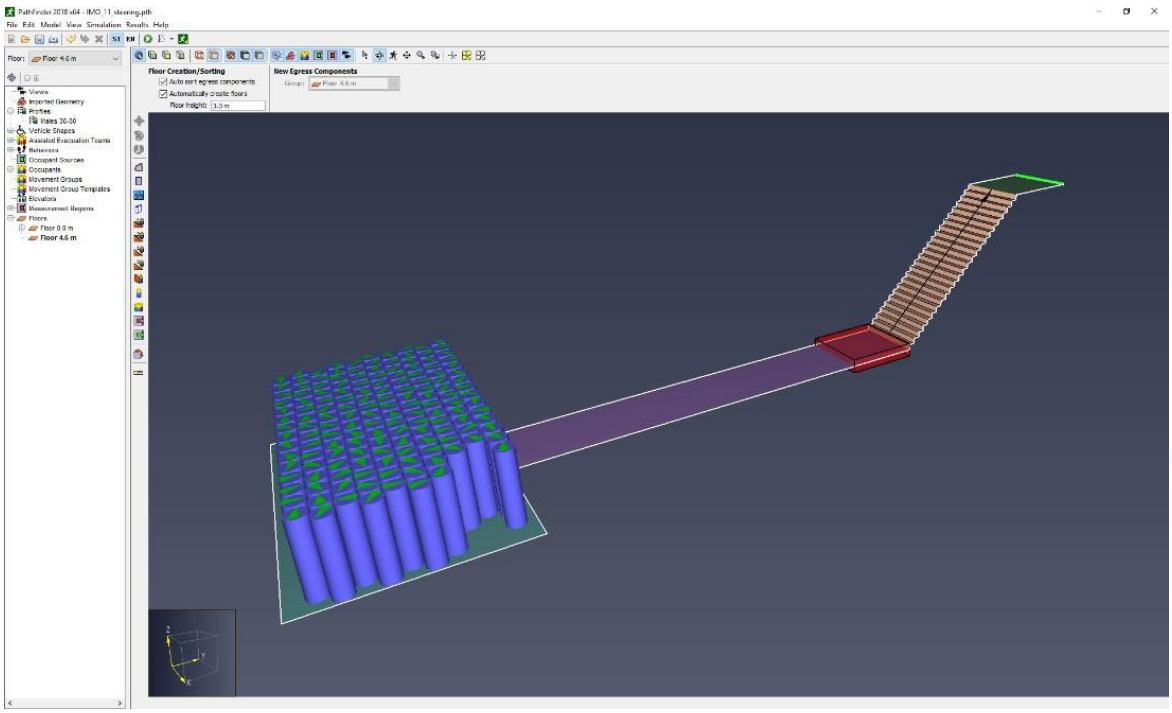


Рисунок 143. Настройка задачи IMO_11.

Конкретное определение скопления дано в разделе 3.7 стандарта IMO 1533 (IMO 2016). Заторы возникают при выполнении одного из следующих условий: начальная плотность составляет не менее 3,5 чел/м2, или очереди растут (скапливаются агенты) со скоростью более 1,5 чел/с на стыке между двумя компонентами эвакуации.

Начальная плотность в комнате размером 5 x 8 м, в которой находится 150 человек, составляет 3,75 чел/м2. Исходя из критериев скопления, этого условия достаточно, чтобы считать исходное помещение перегруженным.

Загруженность измеряется с помощью очереди у основания лестницы. Скопление определяется по одному из следующих критериев: 1) начальная плотность, равная или превышающая 3,5 человека/м2; или 2) значительные очереди (скопление более 1,5 человека в секунду между входом и выходом из точки).

6.11.1. Примечания по настройке

150 человек добавляются в исходное помещение с помощью равномерного распределения.

Всем агентам был присвоен профиль, соответствующий мужчинам в возрасте 30-50 лет (как указано в таблице 3.4, Международная морская организация, 2016). На ровной местности (коридор) это дает равномерное распределение скорости в диапазоне от 0,97 м/с до 1,62 м/с (среднее значение 1,3 м/с). В таблице 1.1 отчета ИМО приведена кривая плотности распределения скорости для использовать в расчетах. Для коридора при плотности 0,5 перс/м2 скорость составляет 1,2 м/с, а при плотности 3,5 перс/м2 - 0,1 м/с. Соответствующий нормализованный профиль скорости и плотности показан на рисунке 144.

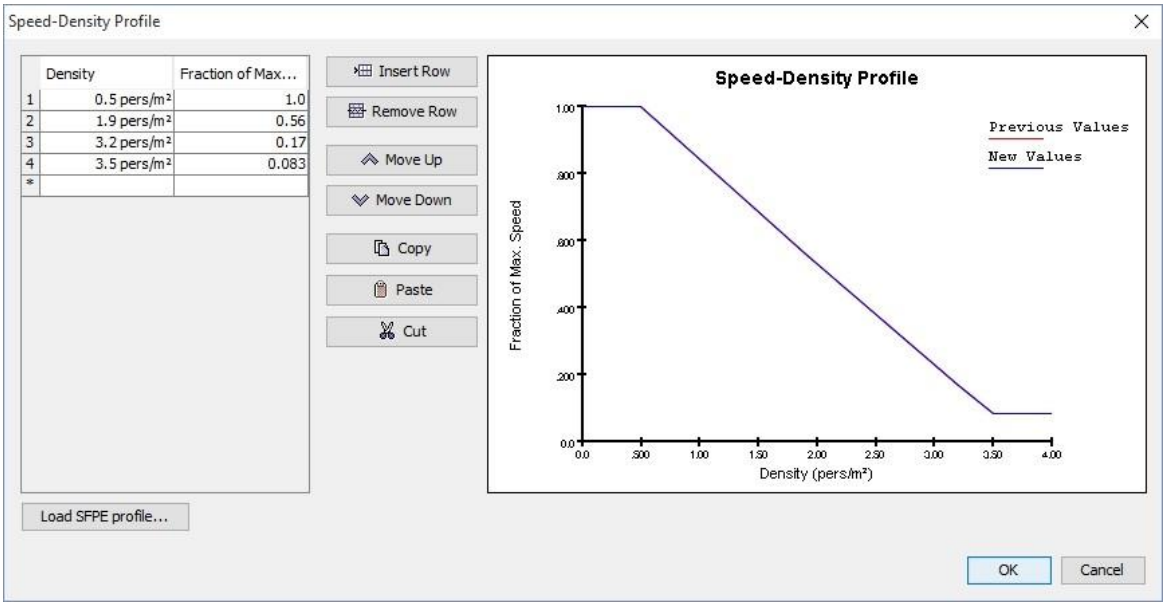


Рисунок 144. Нормализованный профиль скорости-плотности для мужчин в возрасте 30-50 лет на ровном коридоре.

При подъеме по лестнице скорость представляет собой равномерное распределение скорости в диапазоне от 0,47 м/с до 0,79 м/с (среднее значение 0,63. В таблице 1.3 отчета IMO приведены конкретные кривые скорости потока и скорости, которые следует использовать при подъеме по лестнице. При плотности 0,5375 пер/м2 скорость составляет 0,8 м/с, а при плотности 2 пер/м2 - 0,44 м/с.

Соответствующий нормализованный профиль скорости-плотности на лестнице вверх показан в нормализованной скорости-плотности.

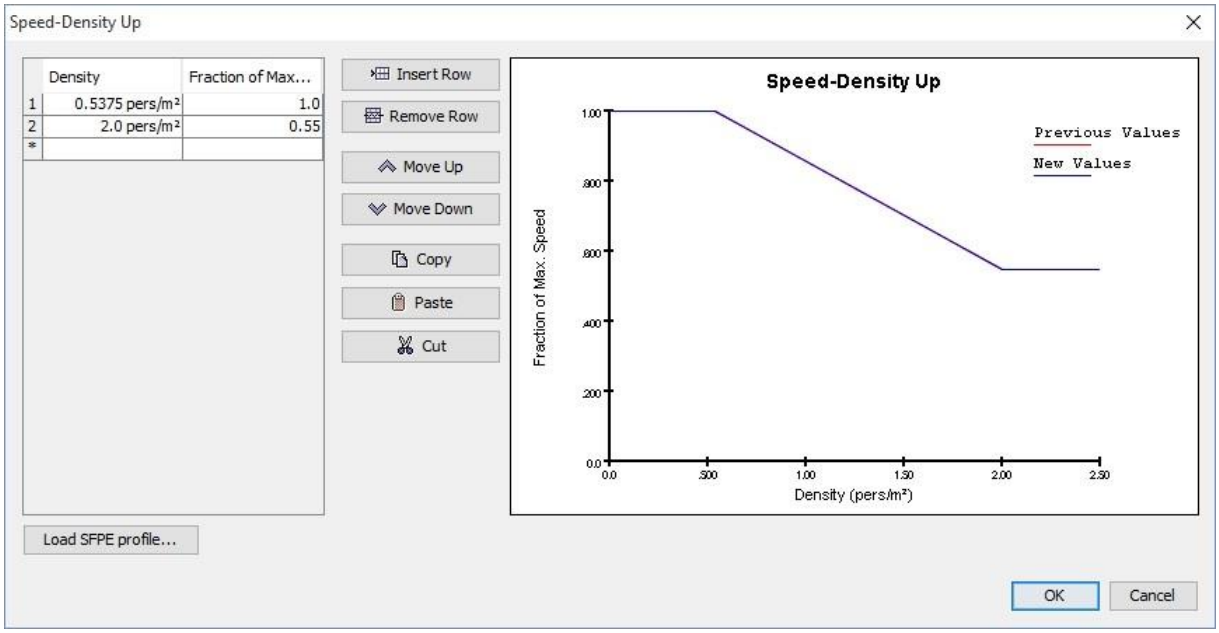


Рисунок 145. Нормализованный профиль скорости-плотности для 30-50-летних мужчин на лестнице вверх.

6.11.2. Ожидаемые результаты

В коридоре, ведущем к лестнице, должно образоваться скопление людей. Это будет измеряться средней плотностью и средней скоростью движения людей в прямоугольнике 2x2 м у основания лестницы. Результаты с лестницей и без нее будут сравниваться.

Мы можем оценить самое быстрое время выхода для случая SFPE. Для скорости ходьбы 1,62 м/с, время преодоления 12-метрового коридора составляет 7,4 с (пренебрегая инерцией).

Длина лестницы составляет 5,7 м, поэтому для снижения скорости на лестнице на 50% необходимо время 7,0 с. Переход через площадку требует еще 1,2 с, в результате чего общее время составляет 15.6 s.

6.11.3. Результаты

Общее время эвакуации для трех случаев приведено в таблице 17.

Таблица 17. Общее время эвакуации для всех трех режимов

Режим	Первый прошедший (с)	Последний прошедший (с)
Рулевое управление	17.00	152.70
Рулевое управление+ SFPE	17.40	156.25
SFPE	17.90	160.90

На рисунке 146 наглядно показано образование заторов у основания лестницы. Контур плотности показывает плотность около 2,75 перс/м2 у основания лестницы.

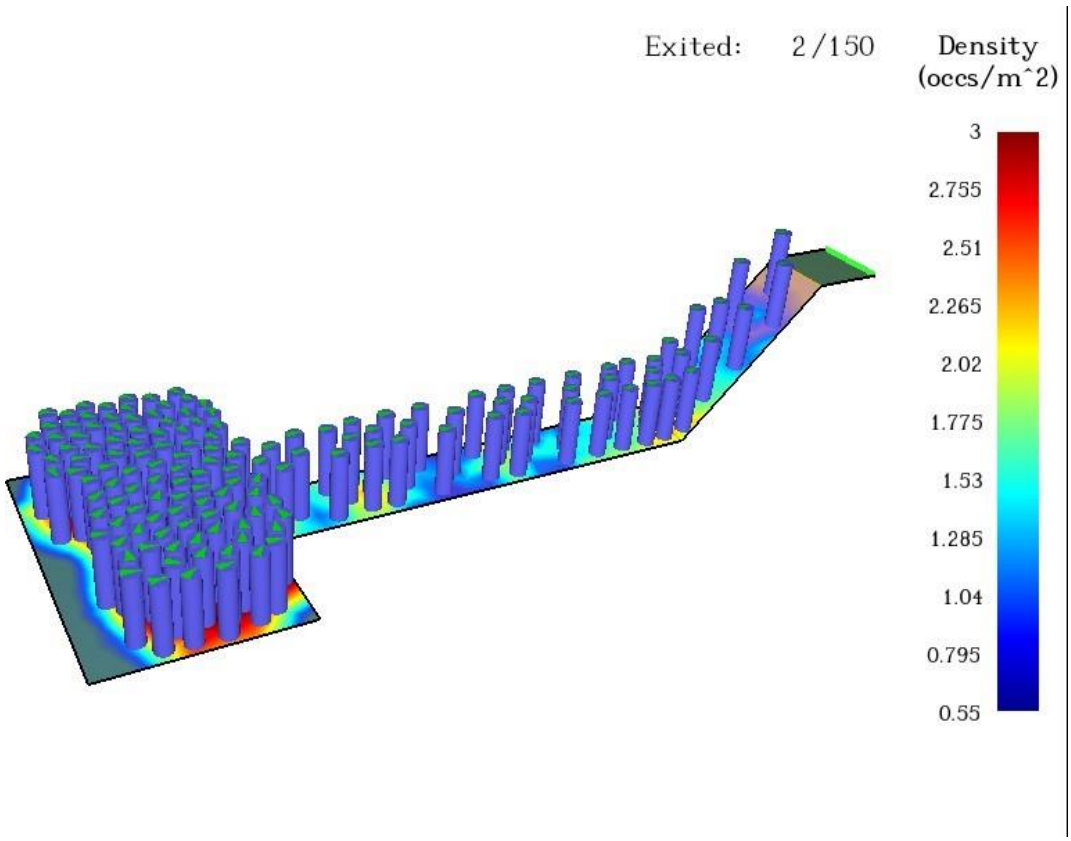


Рисунок 146. Визуальная демонстрация затора у основания лестницы.

Данные временной истории, описывающие среднюю плотность и скорость движения людей у основания лестницы с лестницей и без нее, показаны на рис. 147 и рис. 148. Без лестницы люди продолжают двигаться к выходу со скоростью около 1 м/с, а максимальная плотность составляет около 1,25 чел/м2. С лестницей образуется затор, который приводит к максимальной плотности около 3,0 перс/м2, а скорость падает до 0,25 м/с.

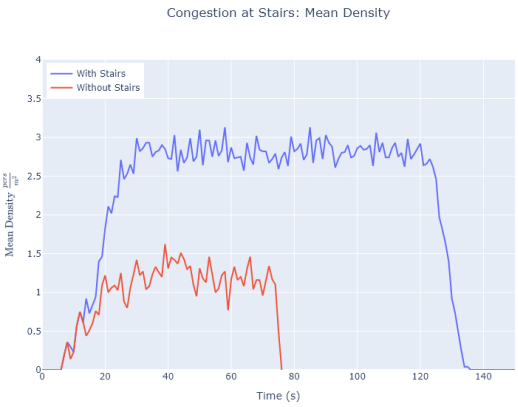


Рисунок 147. Сравнение средней плотности у основания лестницы с лестницей и без нее

Рисунок 148. Сравнение скорости ходьбы у основания лестницы с лестницей и без нее

6.11.4. Анализ

У основания лестницы образуется затор, как показывает сравнение средней плотности и скорости у основания лестницы для случаев с лестницей и без нее. Из-за предполагаемой фундаментальной диаграммы максимальная плотность достигает приблизительно 3,0 пер/м2, а не 3,5 пер/м2, как предполагается в HMO для заторов.

Тем не менее, результаты исследования Pathfinder показывают скопление, которое соответствует указанным скоростям ходьбы и кривым "скорость-плотность".

7. Эвакуационные испытания NIST

В этом разделе представлены тестовые примеры, описанные в Технической записке NIST 1822 2013. В разделе 3 «Предлагаемые тесты верификации и валидации» представлен новый набор рекомендуемых тестов верификации и рассмотрены возможные примеры тестов валидации. Тесты были представлены в отношении пяти основных базовых элементов, имеющихся в моделях эвакуации, а именно: 1) время до эвакуации, 2) движение и навигация, 3) использование выхода, 4) доступность маршрута и 5) условия/ограничения потока.

7.1. Распределение времени до эвакуации (Verif.1.1)

Модификация теста IMO Test 5, который уже был представлен.

7.2. Скорость в коридоре (Verif.2.1)

IMO Тест 1, который уже был представлен.

7.3. Скорость на лестнице (Verif.2.2)

IMO Тесты 2 и 3, которые уже были представлены.

7.4. Огибание угла (Verif.2.3)

IMO Тест 6, который уже был представлен.

7.5. Назначенные демографические данные (Verif.2.4)

Модификация теста IMO 7, который уже был представлен.

7.6. Снижение видимости в сравнении со скоростью ходьбы (Verif.2.5)

Текущая версия Pathfinder не использует видимость для изменения скорости ходьбы, поэтому этот тест проверки не применим.

Pathfinder позволяет пользователю задать модификатор скорости для комнаты, который может быть определен как значение в зависимости от времени. Это можно использовать для аппроксимации эффекта дыма в помещении. См. раздел "Ручная связь FDS и Pathfinder для реагирования на дым".

7.7. Вывод из строя агентов (Verif.2.6)

Этот тест проверяет возможность моделирования потери трудоспособности людей из-за токсического и физического воздействия дыма. Pathfinder может рассчитать FED для агентов, но воздействие FED не изменяет поведение агентов.

Предлагаемый тест (рис. 149) представляет собой помещение без источника огня (10 м x 10 м x 3 м). В помещении находится неподвижный человек. Помещение заполняется газом при опасных условиях, соответствующих расчету дробной эффективной дозы (FED), реализованному в программном обеспечении. Сравнение проводится с ручными расчетами или моделированием пожара.

На рисунке 150 показана модель Pathfinder. В центре модели расположены устройства для измерения CO, CO2, O2 и значения FED, рассчитанного FDS.

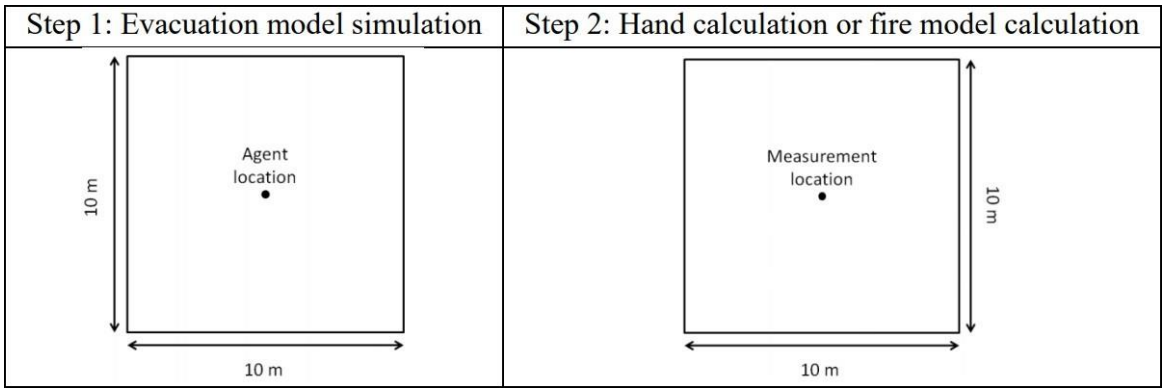


Рисунок 149. Геометрия проверки недееспособности Verif.2.6. Рисунок из технической записки NIST 1822, 2013 г.

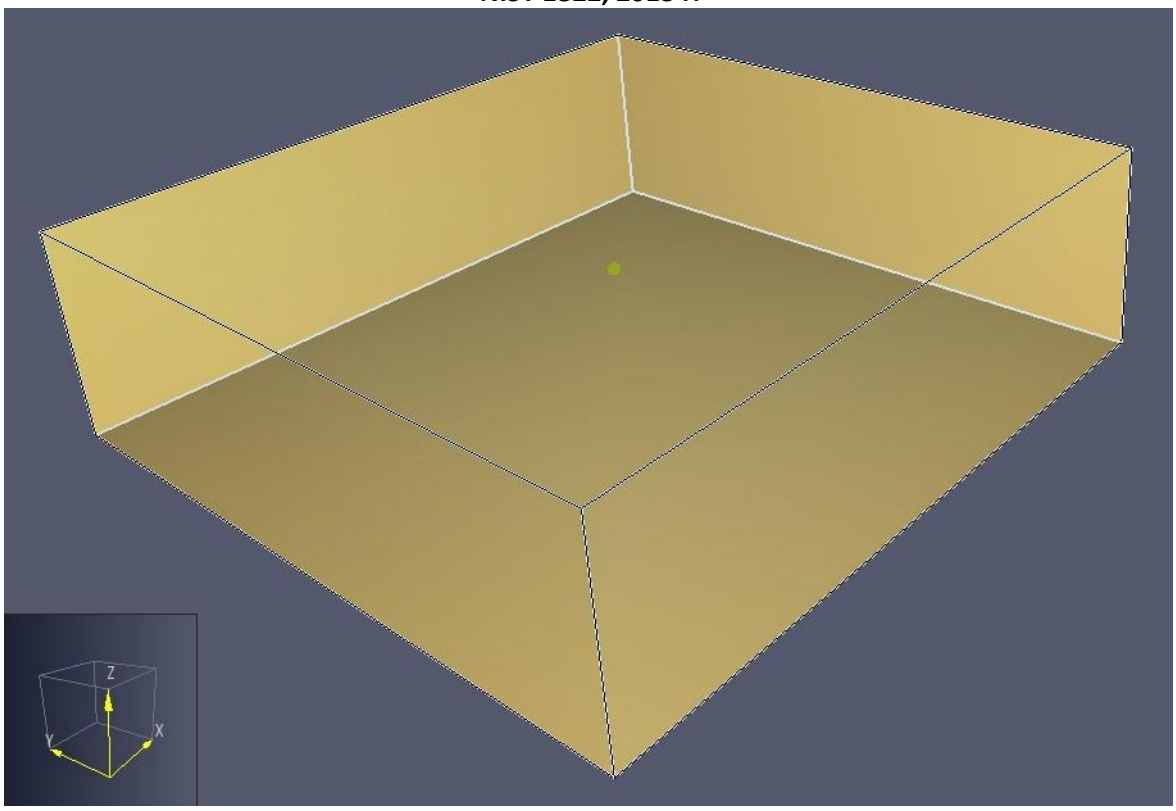


Рисунок 150. Модель Pathfinder

7.7.1. Примечания по настройке

Для расчета дробной эффективной дозы в Pathfinder FED) используются уравнения, описанные в SFPE Handbook of Fire Protection Engineering 5th Edition, том 3, глава 63, страницы 2308-2428. В реализации используются только концентрации удушливых газов CO, CO2 и O2 для расчета значения FED.

$$FED_{tot} = FED_{(CO)} \times V\,CO_2 + FED_{O_2}$$

В этот расчет не входит эффект цианистого водорода HCN), а эффект CO2 обусловлен только гипервентиляцией.

Более подробную информацию см. в Руководстве пользователя Pathfinder и Техническом руководстве Pathfinder.

В таблице 18 приведены массовые и объемные доли воздуха и газовой смеси, использованные для расчета потери трудоспособности. FED был рассчитан для воздуха и для случая потери трудоспособности.

Таблица 18. Массовые и объемные доли воздуха и смеси для расчета недееспособности

Виды	Воздух		Расчет недееспособности	
	Массовая доля	Объемная доля	Массова я доля	Объемная доля
N2	7.630774E-01	7.835682E-01	8.270000E-01	8.420530E-01
O2	2.311814E-01	2.078229E-01	1.500000E-01	1.337080E-01
CO2	5.919362E-04	3.869034E-04	1.000000E-02	6.481168E-03
CO	0	0	5.000000E-03	5.091609E-03
H2O	5.149269E-03	8.222023E-03	8.000000E-03	1.266627E-02

7.7.2. Ожидаемые результаты

Расчет FED для воздуха должен быть приблизительно равен нулю в течение всего времени. Расчет FED с использованием газовой смеси для обездвиживания должен линейно увеличиваться с течением времени. Время, в течение которого FED равен единице, должно совпадать с расчетом, выполненным вручную, и расчетом на симуляторе пожара.

7.7.3. Результаты

При 300 секундах расчет FED для чистого воздуха составил 0,001589. Небольшое ненулевое значение объясняется небольшим различием в объемной доле O2, принятой по умолчанию в FDS, по сравнению со значением 20,9 в уравнениях SFPE.

Для расчета потери трудоспособности, FED=1 был рассчитан на 247,5 секунды. Ручной расчет дает 247,4. Расчетный результат совпадает с ожидаемым.

7.8. Использование лифта (Verif.2.7)

Этот тест проверяет способность моделей эвакуации имитировать эвакуацию с помощью лифтов. Схема геометрии показана на рисунке 151. Соответствующая модель Pathfinder показана на рисунке 152.

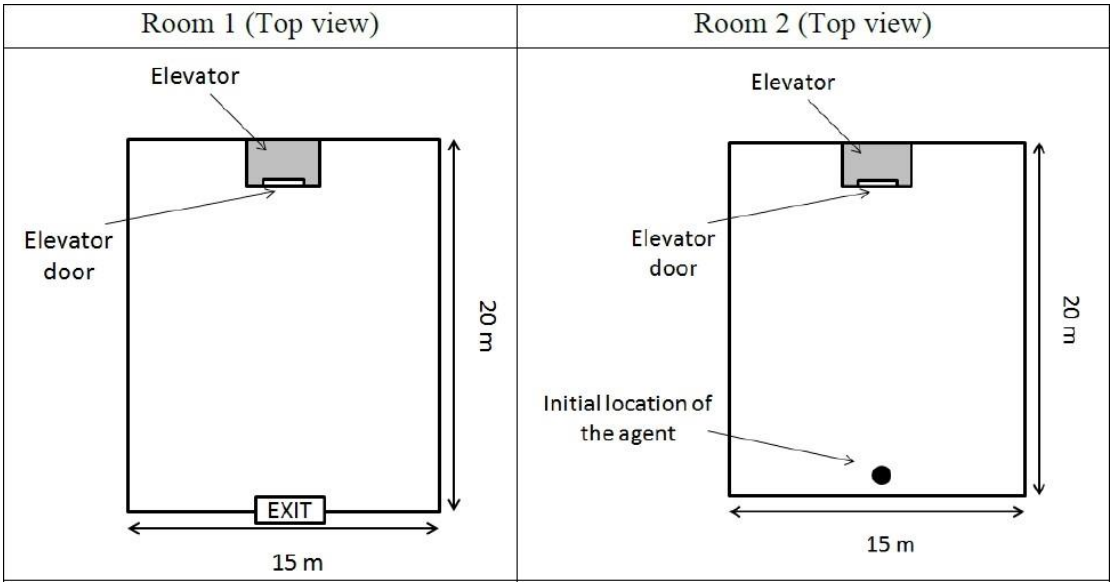


Рисунок 151. Геометрия проверки лифта Verif.2.7. Рисунок из технической записки NIST 1822, 2013 г.

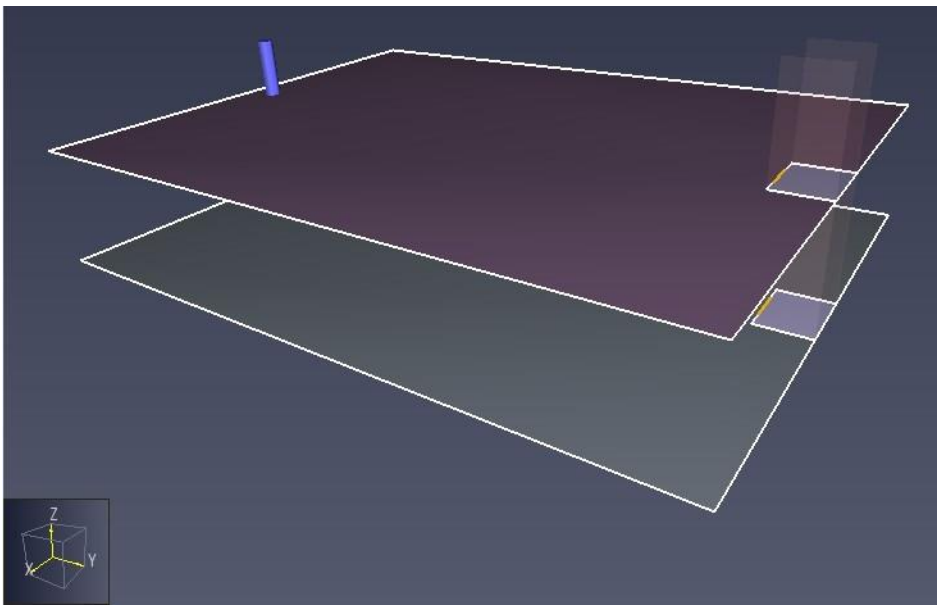


Рисунок 152. Модель Pathfinder для проверки лифта

7.8.1. Примечания по настройке

Комната 1 расположена на уровне Z=0,0, а комната 2 - на уровне Z=3,5 м. Лифт соединяет эти две комнаты в соответствии с рисунком 151. Выходная дверь этажа 1 имеет ширину 1 м. Лифт вызывается из помещения 1, доезжает до помещения 2, перевозит агента и возвращается в помещение 1.

Скорость беспрепятственной ходьбы агента в комнате 2 составляет 1 м/с, время реакции мгновенное. Чтобы минимизировать эффект инерции, время ускорения было установлено на ноль. Для упрощения расчетов расстояния размер агента был установлен на 50 см. Начальное расстояние между центром человека и дверью лифта составляет 17,5 м.

Однако, поскольку радиус агента составляет 0,25 м, а расстояние от лифта до активации вызова - 0,5 м, агент проходит 16,75 м, чтобы активировать вызов.

Параметры лифта включают: время открытия и закрытия дверей - 3,5 с, время движения между двумя этажами - 2,5 с, задержка открытия и закрытия дверей - 5,0 с. Задержка открытия - это минимальное время, в течение которого двери лифта остаются открытыми на этаже (не влияет на данный тестовый пример), а задержка закрытия - это время, в течение которого двери лифта остаются открытыми после того, как последний человек вошел в него.

7.8.2. Ожидаемые результаты

Агент начинает идти в нулевой момент времени, а лифт вызывается с разгрузочного этажа после того, как агент пройдет 16,75 м. После вызова дверь должна закрыться на разгрузочном этаже, а затем лифт должен переместиться на второй этаж. Затем дверь открывается, агент входит в лифт, удаляясь от двери на расстояние, равное радиусу агента (агент движется под углом примерно 45°), происходит задержка закрытия двери, и, наконец, дверь закрывается.

Затем лифт перемещается на выходной этаж, дверь открывается, и человек покидает здание.

Общее ожидаемое время эвакуации составляет 60,60 с, как показано в таблице 19.

Таблица 19. Расчет ожидаемого времени эвакуации

Задание	Расчет	Суммарное время
Начало	0.0	0.0
Движение для активации вызова лифта	16.75	16.75
Дверь закрывается на разгрузочной площадке	3.50	20.25
Время подъема на лифте	2.50	22.75
Открытая дверь на этаже для звонков	3.50	26.25
Время загрузки	0.35	26.60
Время задержки закрытия двери	5.00	31.60
Закрытие двери на вызывном этаже	3.50	35.10
Время движения лифта при разгрузке	2.50	37.60
Открытая дверь на разгрузочном полу	3.50	41.10
Время выхода из здания	19.50	60.60

7.8.3. Результаты

Наблюдаемое время выхода составляет 60,5 с для режима SFPE. Идентичные результаты (в пределах допуска) были получены для режимов Steering+ SFPE и Steering.

Все режимы прошли испытания.

7.9. Горизонтальные противотоки (Verif.2.8)

Модификация теста IMO Test 8, который уже был представлен.

7.10. Групповое поведение (Verif.2.9)

Этот тест проверяет передвижение в группе. Группа (зона 1) определяется, когда четыре члена группы имеют скорость ходьбы 1,25 м/с, а один - 0,5 м/с. В зоне 2 скорость беспрепятственного передвижения отдельных людей составляет 0,2 м/с. Все агенты направляются к выходу шириной 1 м.

Геометрия, определенная в документе NIST, и соответствующая модель Pathfinder показаны на Рисунке 153 и Рисунке 154. В модели Pathfinder синие и красные агенты находятся в группе, а центральный агент имеет низкую скорость. Зеленые агенты действуют индивидуально.

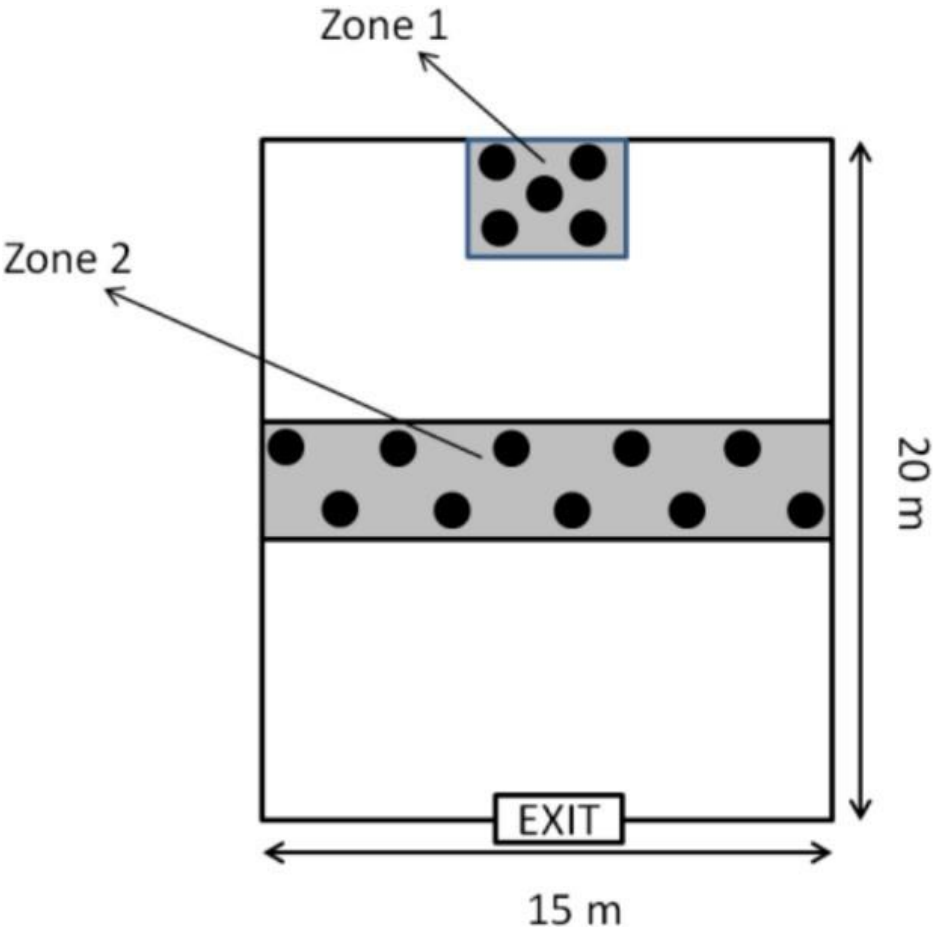


Рисунок 153. Техническая записка NIST 1822, 2013 г.

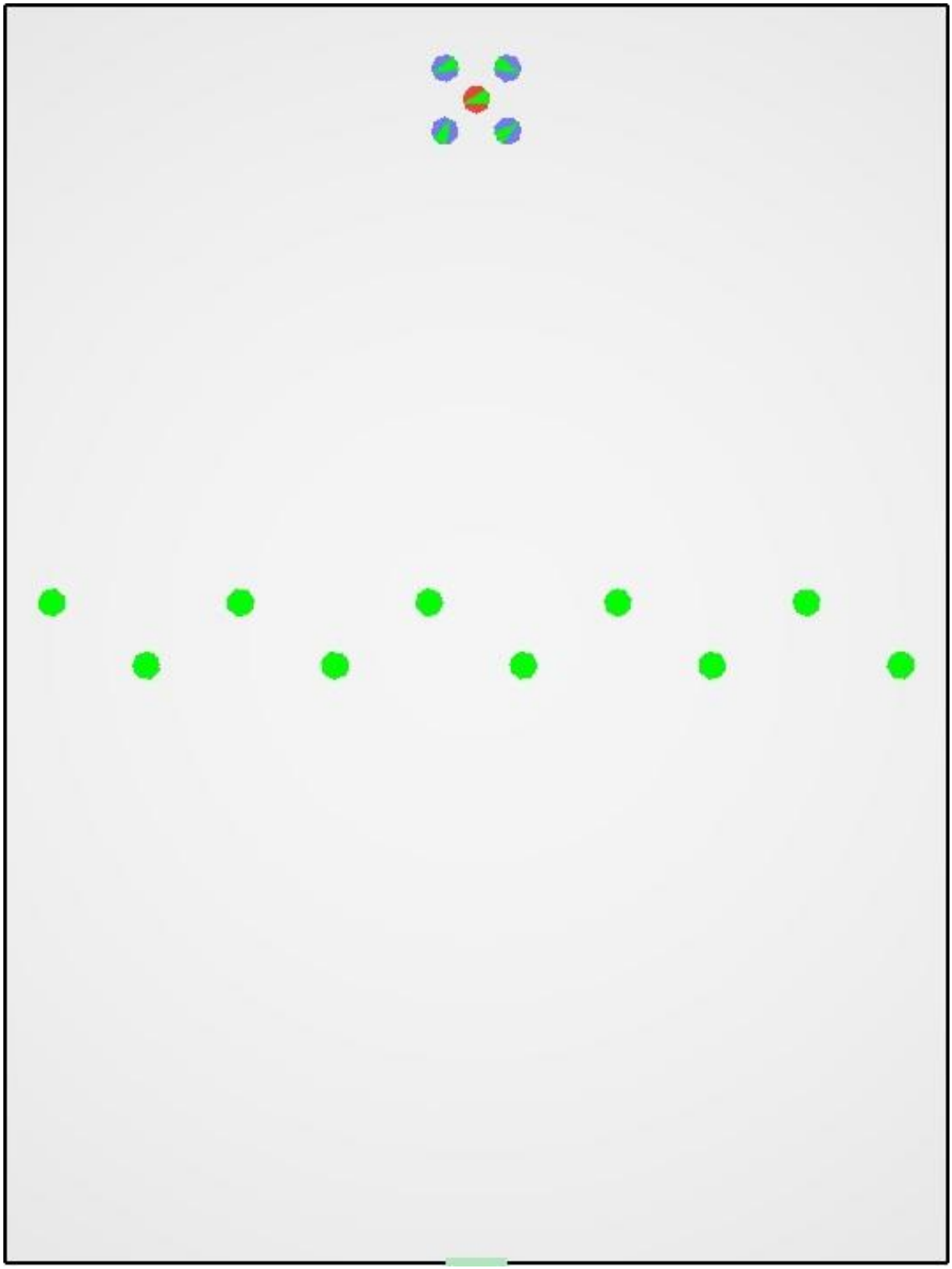


Рисунок 154. Модель Pathfinder

7.10.1. Примечания по настройке

Два параметра в Pathfinder управляют поведением группы: Максимальное расстояние и Время замедления. Члены группы стараются поддерживать расстояние между собой меньше максимального. Если кто-то из членов группы отделяется от нее на расстояние, превышающее максимальное, ведущие члены замедляются на интервал, равный времени

замедления. Если по истечении этого времени группа все еще не перестроилась, то ведущие члены останавливаются и ждут, пока группа перестроится.

Результаты будут представлены с использованием параметров Pathfinder по умолчанию, которые определяют относительно свободную группу, максимальное расстояние = 2 м и время замедления = 3 с.

Представлены только результаты для режима рулевого управления, поскольку рулевое управление+ SFPE дает аналогичные результаты. В режиме SFPE агенты могут перекрывать друг друга, поэтому, как и ожидалось, группа просто проезжает через медленных агентов без взаимодействия.

7.10.2. Ожидаемые результаты

Группа из пяти человек должна оставаться вместе и выйти из двери в течение 10 секунд.

7.10.3. Результаты

На рисунках 155, 156 и 157 показана последовательность изображений для группировки по умолчанию, демонстрирующая движение на 20 с, на 36,5 с, когда выходит первый член группы, и на 45 с, когда выходит последний член группы. Интервал времени для выхода группы составляет 8,5 секунды.

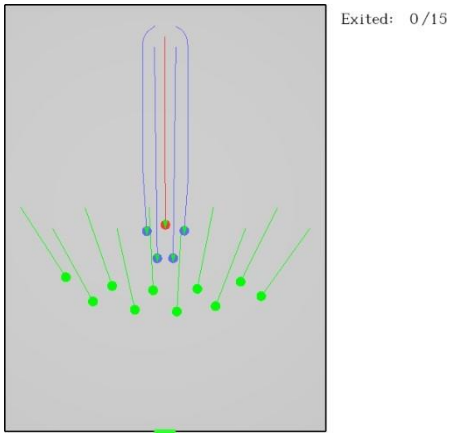


Рисунок 155. 20 секунд

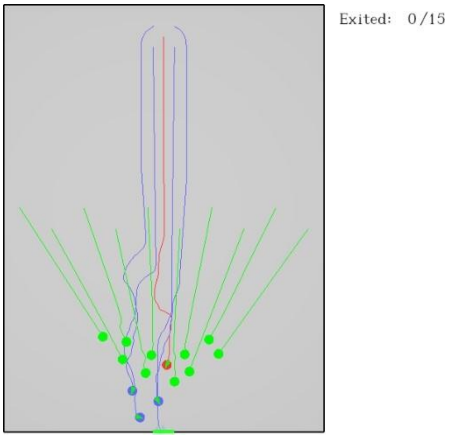


Рисунок 156. Выход первой группы через 36,5 секунд

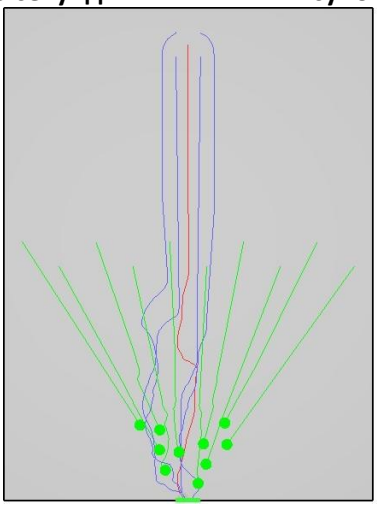


Рисунок 157. 45 секунд последнего выхода группы

7.11. Люди с ограниченными возможностями передвижения (Verif.2.10)

Этот тест предназначен для проверки возникающих форм поведения людей с ограниченными возможностями. В нем проверяется возможность имитации агента с ограниченной мобильностью (например, снижение скорости движения и увеличение занимаемого пространства), а также представление взаимодействия между людьми с ограниченными возможностями и остальным населением и окружающей средой.

Постройте две комнаты на разной высоте: комнату 1 в 1 м над уровнем земли) и комнату 2 (на уровне земли), соединенные пандусом (или коридором/лестницей, если в модели не предусмотрены пандусы). Вставьте один выход (1 м шириной) в конце комнаты 2.

Сценарий 1 Помещение 1 заселено агентами, состоящим из 24 человек в зоне 1 (со скоростью беспрепятственной ходьбы 1,25 м/с и размером тела по умолчанию, принятым в модели) и 1 инвалида в зоне 2 (предполагается, что скорость беспрепятственной ходьбы этого человека равна 0,8 м/с на горизонтальных поверхностях и 0,4 на пандусе. Также предполагается, что инвалид занимает площадь, превышающую половину ширины пандуса (более 0.75 м). Все агенты должны добраться до выхода из помещения 2.

Сценарий 2 Повторно проведите тест и заполните зону 2 человеком, имеющим те же характеристики, что и остальные 24 человека в зоне 1 (т.е. не моделируются люди с ограниченными возможностями). Все люди должны добраться до выхода из помещения 2.

Схема геометрии показана на рисунке 158. Соответствующая модель Pathfinder показана на рисунке 159.

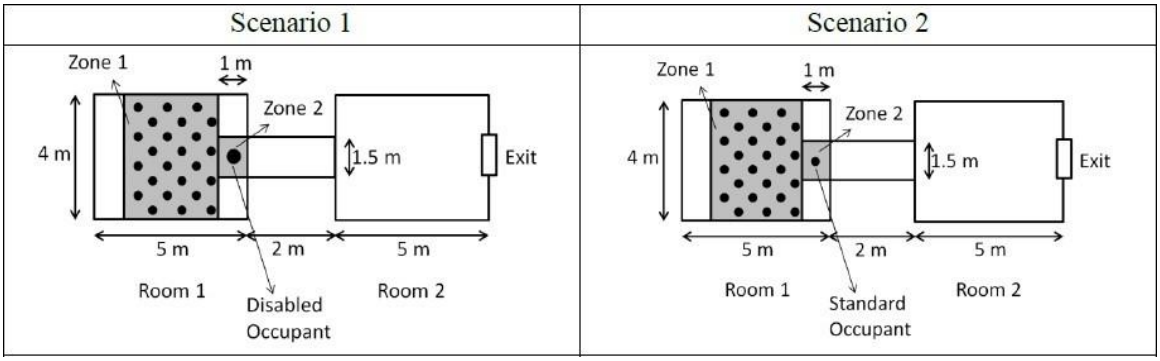


Рисунок 158. Геометрия проверки инвалидности при движении Verif.2.10. Рисунок из технической записки NIST 1822, 2013.

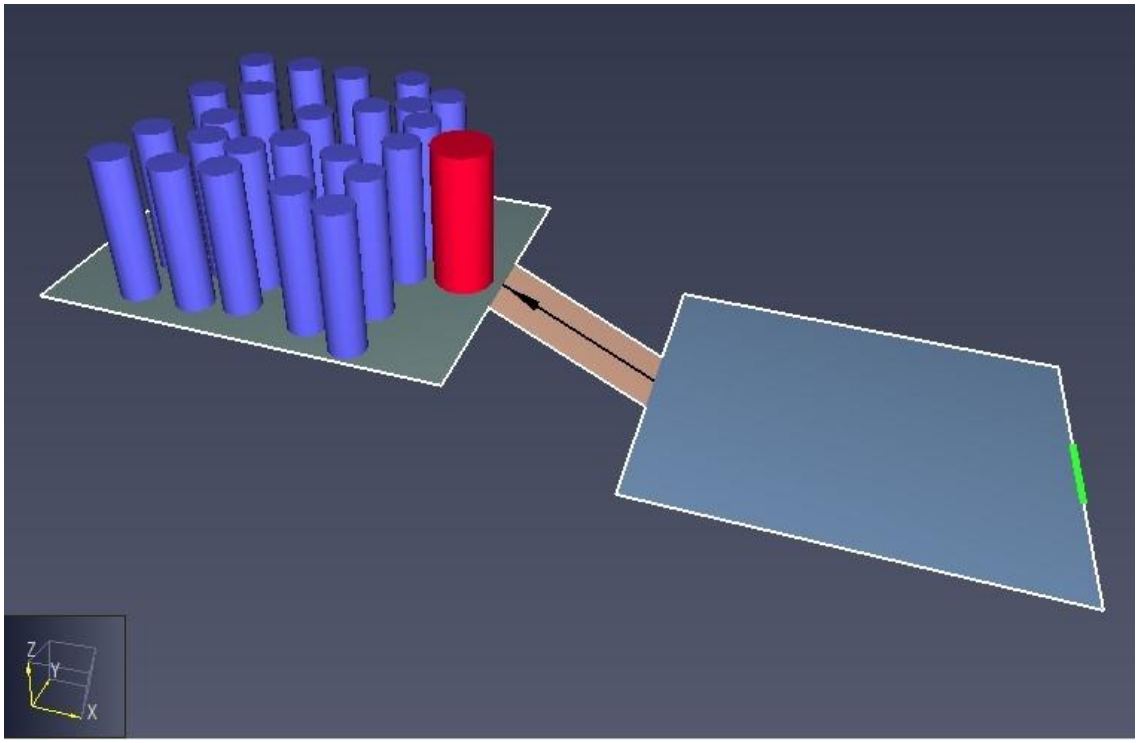


Рисунок 159. Модель Pathfinder движения с ограниченными возможностями. Красный жилец имеет инвалидность.

7.11.1. Примечания по настройке

Геометрия помещения задана в соответствии с определением. Ширина плеч 24 человек составляет 45,58 см, а инвалида - 75 см. Скорость ходьбы 24 жильцов комнаты 1 составляет 1,25 м/с, а скорость ходьбы инвалида была определена как 0,8 м/с. Для инвалида была определена скорость движения по пандусу 0,4 м/с, при этом остальные люди шли с той же скоростью по пандусу и уровню.

Расчеты SFPE и Steering+ SFPE включали пограничный слой толщиной 15 см.

7.11.2. Ожидаемые результаты

Все люди достигнут выхода. Время эвакуации по сценарию 1 будет больше, чем по сценарию 2.

7.11.3. Результаты

В таблице 20 показано время эвакуации всех людей. Инвалид немного замедлил эвакуацию, заблокировав поток на пандусе, но после схода с пандуса более быстрые агенты двигались вокруг инвалида, поэтому эффект замедления уменьшился, Рисунок 160 и Рисунок 161.

Таблица 20. Время эвакуации всех людей

Режим	Сценарий 1 (с)	Сценарий 2 (с)
Рулевое управление	43.88	34.58
Рулевое управление+ SFPE	49.77	39.27
SFPE	36.10	32.70

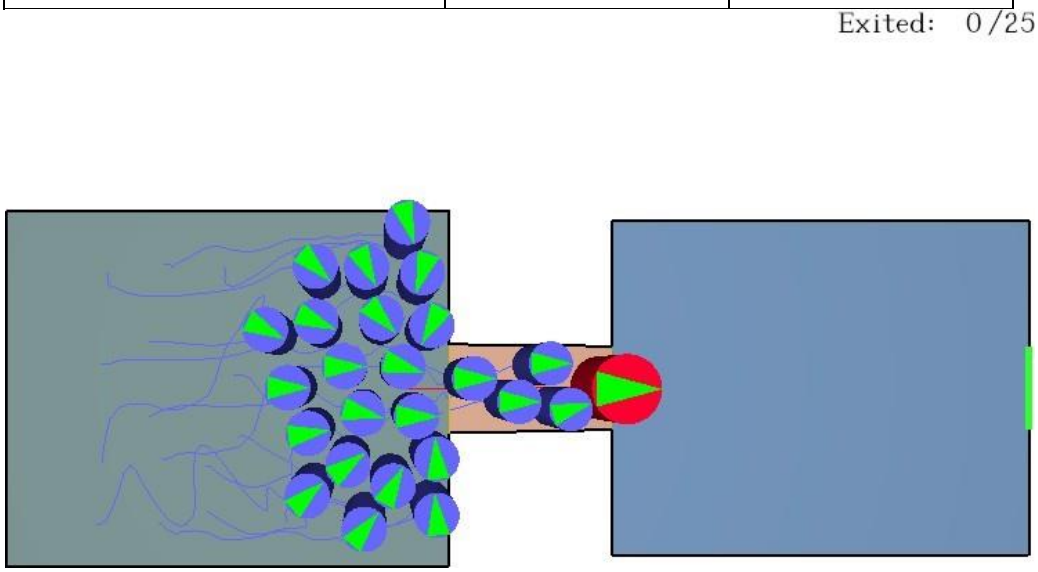


Рисунок 160. Режим рулевого управления, показывающий, что инвалид блокирует поток на рампе. Линиями показаны пути.

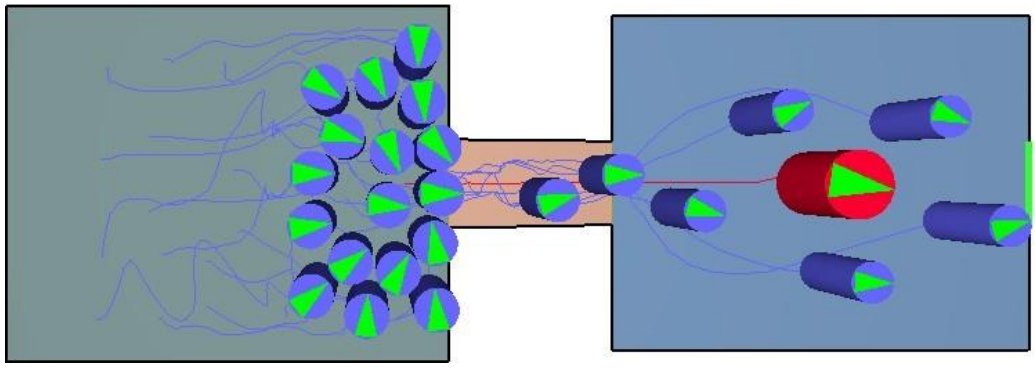


Рисунок 161. Режим рулевого управления, показывающий, как более быстрые агенты движутся вокруг агента с ограниченными возможностями по пандусу. Линии показывают траекторию движения.

7.12. Распределение маршрутов выхода (Verif.3.1)

Модификация IMO Test 10, которая уже была представлена.

7.13. Социальное влияние (Verif.3.2)

В текущей версии Pathfinder не используется социальное влияние, поэтому этот проверочный тест неприменим.

7.14. Принадлежность (Verif.3.3)

В текущей версии Pathfinder не используется социальная принадлежность, поэтому этот проверочный тест неприменим.

7.15. Динамическая доступность выходов (Verif.4.1)

Этот тест направлен на качественную оценку возможностей модели по представлению динамической доступности выходов.

Постройте комнату размером 10 м на 15 м. На 15-метровых стенах комнаты имеются два выхода шириной 1 м, которые находятся на одинаковом расстоянии от стены длиной 10 м в конце комнаты (см. рис. 162).

Вставьте в комнату человека с временем реакции, равным 0, и постоянной скоростью ходьбы, равной 1 м/с, как показано на рисунке 162. Выход 1 становится недоступным после 1 с времени моделирования. Проверьте использование выходов 1 и 2. Схема геометрии показана на рисунке 162.

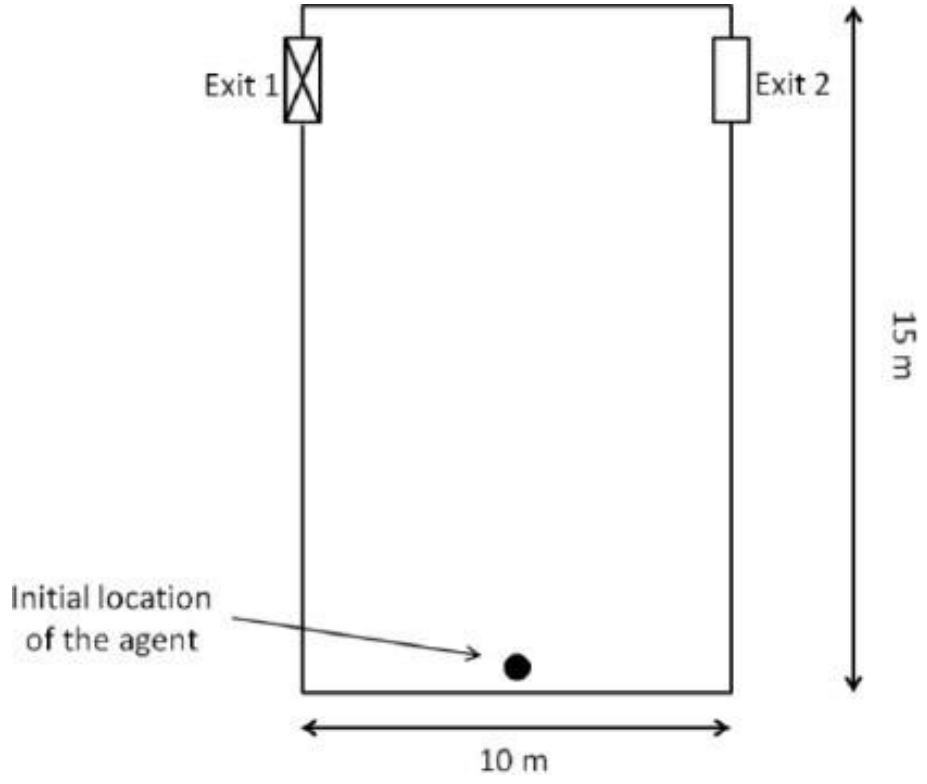


Рисунок 162. Геометрия для динамической доступности выходов Verif.4.1. Рисунок из технической записки NIST 1822, 2013 г.

7.15.1. Примечания по настройке

Геометрия комнаты задана в соответствии с определением. Pathfinder использует алгоритм "локально самый быстрый" для выбора двери выхода из комнаты. Чтобы убедиться, что жилец выберет выход 1, его располагали на расстоянии X=4,5 м или X=0,5 м ближе по направлению X к выходу 1.

7.15.2. Ожидаемые результаты

Сначала агент выберет выход 1, а через 1,0 с перейдет к выходу 2.

7.15.3. Результаты

На рисунке 163 показан путь, пройденный человеком. В 1,0 с агент переходит от выхода 1 к выходу 2. Такой же результат был получен для режимов Steering+ SFPE и SFPE.

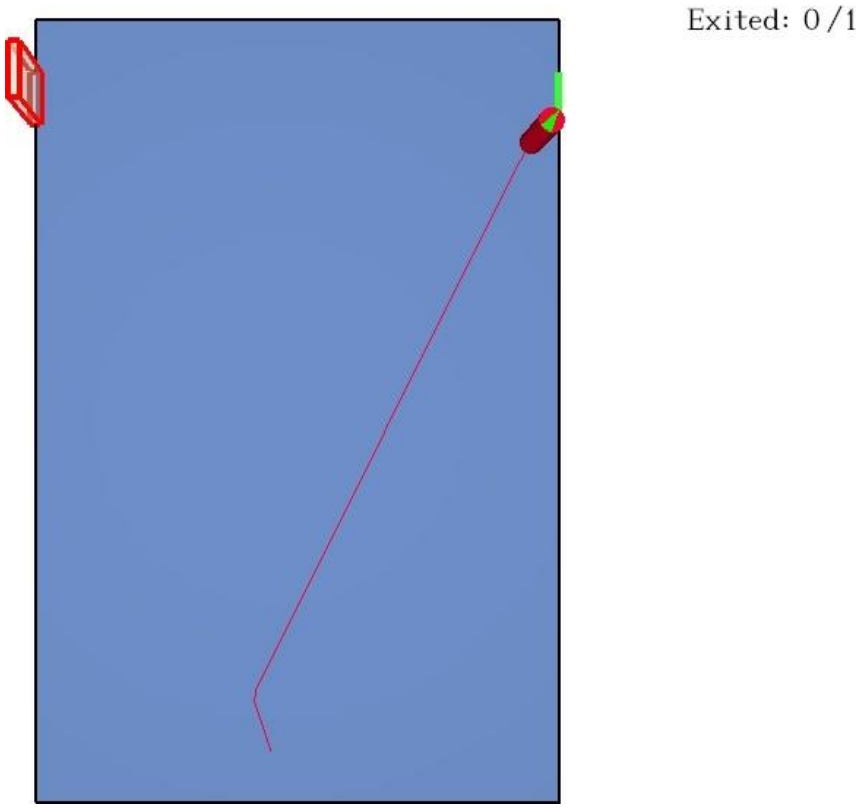


Рисунок 163. Изменение выбора выхода на 1,0 с. Линия показывает траекторию. Режим рулевого управления.

7.16. Скопления (Verif.5.1)

Модификация IMO Test 11, которая уже была представлена.

7.17. Максимальная скорость потока (Verif.5.2)

Модификация теста IMO Test 4, который уже был представлен.

8. Тестовые задачи SFPE

В этом разделе представлены результаты Pathfinder для моделей, основанных на примерах задач, приведенных для ручных расчетов, представленных в инженерном руководстве по поведению человека при пожаре (SFPE 2019).

8.1. Пример 1 Одно помещение и лестница (SFPE_1)

Это проверочный тест для результатов моделирования на основе SFPE. Этот пример воспроизводит пример 1, приведенный в Руководстве по проектированию SFPE. В этом примере 300 человек первоначально размещаются в помещении неопределенной геометрии. Люди выходят через две 32-дюймовые двери, которые ведут к двум прилежащим 44-дюймовым лестницам. Комната соединена (напрямую) с двумя лестницами шириной 44 дюйма через две 32-дюймовые двери. Агенты должны пройти через двери и спуститься по лестнице размером 7 x 11 дюймов (высота и глубина) и длиной 50 футов. Достигнув основания лестницы, люди выходят из модели через комнату размером 30 x 6 футов. В задаче указывается, что максимальное расстояние между исходным положением агентов и ближайшей дверью на лестницу около 200 футов.

В этом тесте предполагается, что исходная комната имеет размеры 200 x 30 футов, а обе лестницы расположены у одной из стен 30 футов (Рис. 164).

Небольшая комната размером 6 x 30 футов с выходом, расположенным в стене напротив лестницы.

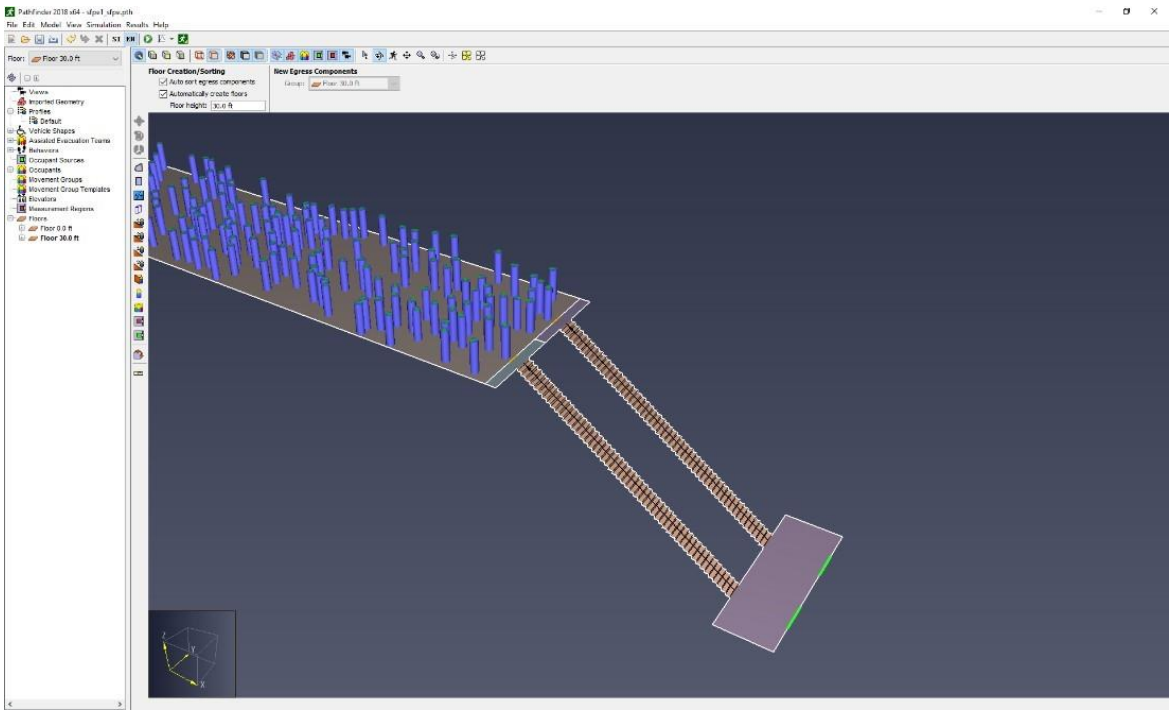


Рисунок 164. Начальная конфигурация для SFPE 1.

8.1.1. Примечания по настройке

Пограничный слой двери задан как 6 дюймов.

8.1.2. Ожидаемые результаты

В этом примере дверь, входящая в каждый лестничный пролет, является управляющим компонентом. Задача симметрична, поэтому для ручного расчета разделенный поток можно смоделировать как одну широкую дверь и лестницу. Чтобы рассчитать общее время движения, мы должны рассчитать TTOTAL= T1+ T2+ T3 где: (T1) - время, необходимое для первого человека для достижения контрольного компонента, (T2) время, необходимое 300 людям для прохождения через две 32-дюймовые двери, и (T3) время, необходимое последнему человеку для перемещения от контрольного компонента к выходу.

Значение T1 зависит от расположения людей. Для данной модели значение T1 составляет примерно= 1,0 с.

Время, необходимое для 300 агентов, чтобы пройти через две 32-дюймовые двери (T2):

$$T_2 = \frac{P}{F_{s_{\max}} W_e} = \frac{300\ pers}{24\ \frac{\text{pers}}{min \bullet ft} \times 2\,(32\ in - 2(6\ in)) \times \frac{1\ ft}{12\ in}} = \mathbf{3.75 min = 225.0\ s}$$

Время, необходимое для того, чтобы последний агент спустился по лестнице и вышел на площадку, T3:

$$T_3 = \frac{d}{v} = \frac{50\ ft}{0.85 \times 212\ \frac{\text{ft}}{\text{min}}} \left(60\ \frac{s}{\text{min}}\right) + \frac{10\ ft}{3.9 \frac{\text{ft}}{s}} = \mathbf{19.2\ s}$$

Общее время эвакуации, Ttotal, составляет:

$$T_{\text{total}} = T_1 + T_2 + T_3 = \mathbf{245\ .2\ s}$$

8.1.3. Результаты

В таблице 21 для каждого режима моделирования указано количество людей, воспользовавшихся каждой лестницей, и общее время эвакуации. Поскольку количество людей, воспользовавшихся левым и правым выходами, не одинаково, мы приводим время для каждой стороны.

Таблица 21. Количество людей, воспользовавшихся каждой лестницей, и общее время эвакуации.

Режим	Кол-во слева	Кол-во справа	Время эвакуации слева, с	Время эвакуации справа, с
Рулевое управление	151	149	241.35	239.60
Рулевое управление+SFPE	148	152	268.70	273.18
SFPE	148	152	239.22	245.18

8.1.4. Анализ

Все случаи показывают удовлетворительное сравнение с ожидаемым результатом.

8.2. Пример 2 Пятиэтажное здание (SFPE_2)

Это проверочный тест для результатов моделирования на основе SFPE. Этот пример воспроизводит пример 2, приведенный в руководстве по проектированию SFPE, SFPE 2019. В этом примере мы имеем 5-этажное здание. Каждый этаж обслуживается двумя лестницами шириной 44 дюйма. Размеры ступени - подъем 7 дюймов и проступь 11 дюймов. Лестницы имеют поручни с обеих сторон на расстоянии 2,5 дюйма от стены. Каждая лестница соединяется с площадкой размером 4 фута x 8 футов, расположенной между этажами. Расстояние между этажами составляет 12 футов. Лестницы соединяются с этажами 32-дюймовыми дверями. На каждом этаже находится 200 человек. На рисунке 165 показана постановка задачи.

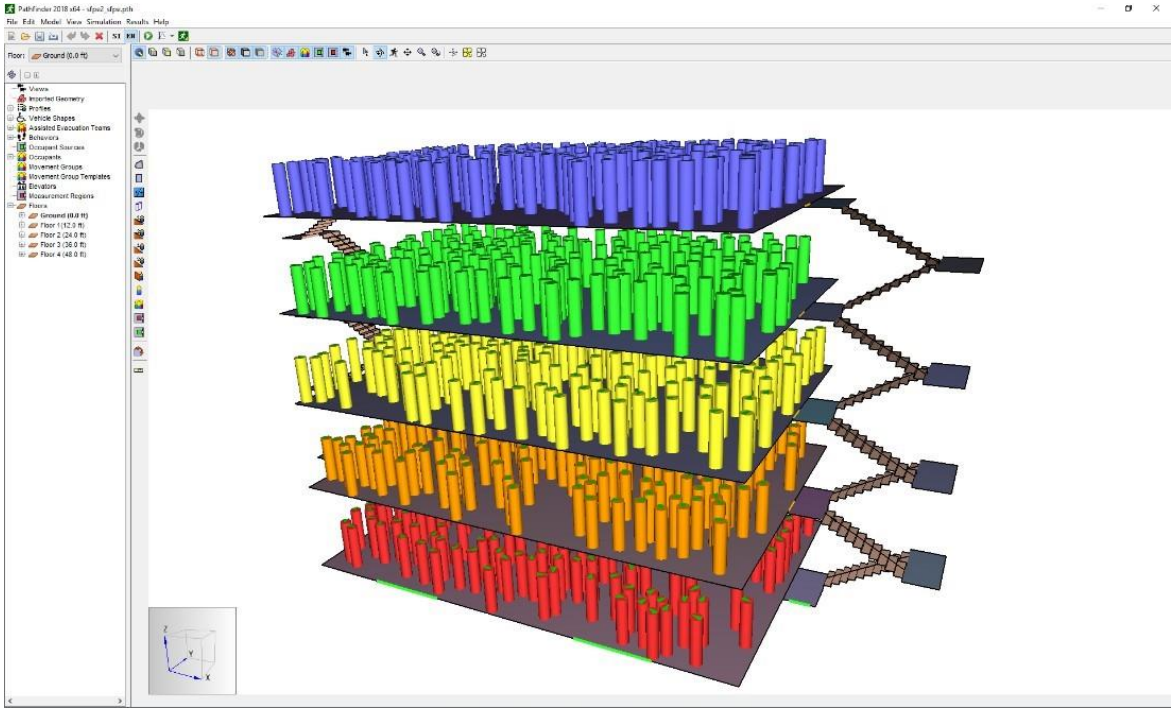


Рисунок 165. Настройка проблемы SFPE Пример 2

8.2.1. Примечания по настройке

Подробные указания по настройке представлены в руководстве по примерам Pathfinder.

В соответствии с замыслом задачи, все обитатели первого этажа выходят из четырех больших боковых дверей, а все обитатели более высоких этажей - из дверей у основания лестницы.

Второй случай режима управления был запущен, когда жильцы предпочитали оставаться в очереди к текущей двери (параметр «Текущее предпочтение дверей» в профиле). Этот параметр был изменен с 35 % по умолчанию до 80 %.

8.2.2. Ожидаемые результаты

В этом примере контролирующим компонентом является выходная дверь у основания лестницы. Мы предположим, что агенты используют лестничные пролеты равномерно, в этом случае нам нужно смоделировать только время, необходимое половине агентов со второго по пятый этажи, чтобы пройти через управляющую 32-дюймовую дверь.

Чтобы рассчитать общее время движения, необходимо вычислить TTOTAL= T1+ T2+ T3 где:

- (T1) - время, за которое первый агент достигает управляющего компонента.
- (T2) - время, необходимое 400 посетителям для прохождения через управляющий компонент. компонент (32-дюймовая дверь).
- (T3) - это время, необходимое последнему агенту для перемещения от управляющего компонента к выходу.

Расчет для T1 состоит из четырех частей:

- (TA) - это время, которое требуется человеку, находящемуся рядом с дверью на втором этаже, чтобы добраться от своего первоначального местоположения до входа на лестницу,
- (TB) - время спуска по лестнице на площадку,
- (TC) - перехода через площадку,
- (TD) - время спуска по лестнице к двери.

Мы предполагаем, что скорость первого человека, достигшего лестницы и площадки, рассчитывается с учетом низкой плотности. Для TA мы предполагаем, что человек должен пройти 6 футов, чтобы достичь центра лестницы. Для TB мы предположим, что человек должен пройти 8 футов, что является средней длиной пути, чтобы пересечь площадку. Это приводит к следующим

$$v_{\text{level}} = 0.85 \times 1.40 \ \frac{m}{s} = 1.19 \ \frac{m}{s}$$

$$v_{\text{stair}} = 0.85 \times 1.08 \ \frac{m}{s} = 0.92 \ \frac{m}{s}$$

$$T_A = \frac{d}{v_{\text{level}}} = \frac{6 \ ft \ \left(\frac{0.3048 \ m}{\text{ft}}\right)}{1.19 \ \frac{m}{s}} = \mathbf{1.5 \ s}$$

$$T_B + T_D = 2\left(\frac{d}{v_{\text{stair}}}\right) = 2\left(\frac{11.17 \ ft}{0.92 \ \frac{m}{s}}\right)\left(\frac{0.3048 \ m}{\text{ft}}\right) = \mathbf{7.4 \ s}$$

$$T_C = \frac{d}{v_{\text{level}}} = \frac{8 \ ft \ \left(\frac{0.3048 \ m}{\text{ft}}\right)}{1.19 \ \frac{m}{s}} = \mathbf{2.0 \ s}$$

$$T_1 = T_A + T_B + T_C + T_D = 1.5 \ s + 7.4 \ s + 2.0 \ s = \mathbf{10.9 \ s}$$

Время прохождения 400 человек через 32-дюймовую дверь T2 равно:

$$T_2 = \frac{P}{F_{s_{\max}} W_e} = \frac{400 \ pers}{1.32 \ \frac{\text{pers}}{m \bullet s} \times [32 \ in - 2\,(6 \ in)] \times \frac{\text{ft}}{12 \ in} \times \frac{0.3048 \ m}{\text{ft}}} = \mathbf{596.5 \ s}$$

Время, за которое последний человек успеет отойти от лестницы к выходу:

$$T_3 = \frac{d}{v_{\text{level}}} = \frac{4 \ ft \ \left(\frac{0.3048 \ m}{\text{ft}}\right)}{1.19 \ \frac{m}{s}} = \mathbf{1.0 \ s}$$

$T_{\text{total}} = T_1 + T_2 + T_3 = 10{,}9 \ c + 596{,}5 \ c + 1{,}0 \ c = \mathbf{608{,}4 \ c}$

8.2.3. Результаты

В таблице 22 для каждого режима моделирования приведены результаты для обоих выходов, включая количество людей, которые воспользовались каждым выходом. Когда на верхних этажах образуются очереди, люди, ожидающие в них, могут решить покинуть свою очередь, когда у другой двери начинается поток, даже если этот поток прерывистый. Возникающее в результате поведение "туда-сюда", хотя и не оказывает существенного влияния на общее время выхода, может выглядеть несколько неожиданно. Pathfinder позволяет пользователю повысить заинтересованность агентов в том, чтобы оставаться в очередях, в которых они находятся в данный момент. Вот результаты, представленные для случая с рулевым управлением (очередью).

Таблица 22. 5Story Здание SFPE_2 Результаты

Режим	Кол-во слева	Кол-во справа	Время эвакуации слева, с	Время эвакуации справа, с
Рулевое управление	396	404	544.73	554.75
Рулевое управление+SFPE	401	399	617.04	614.15
SFPE	409	391	627.03	601.18
Рулевое управление Очередь	415	385	570.42	529.77

8.2.4. Анализ

Среднее время выхода для случая SFPE соответствует ожидаемому значению в пределах допустимого. Случай с режимом Steering+ SFPE является более медленным. Режим Steering быстрее, поскольку скорость потока через дверь не задана явно. Добавление повышенного обязательства оставаться в текущей очереди привело к прекращению движения туда и обратно в альтернативные очереди.

Библиография

1. “ISO 16730-1:2015(E) - Fire Safety Engineering — Procedures and Requirements for Verification and Validation of Calculation Methods.” 2015. International Organization for Standardization.
2. “IEEE 1012-2016 - IEEE Standard for System, Software, and Hardware Verification and Validation.” 2016. Institute of Electrical and Electronics Engineers.
3. Averill, Jason D., Dennis S. Mileti, Richard D. Peacock, Erica D. Kuligowski, Norman Groner, Guylene Proulx, Paul A. Reneke, and Harold E. Nelson. 2005. “Occupant Behavior, Egress, and Emergency Communication. Federal Building and Fire Safety Investigation of the World Trade Center Disaster (NIST NCSTAR 1-7).” National Construction Safety Team Act Reports (NCSTAR). National Institute of Standards and Technology, Gaithersburg, Maryland, USA. https://www.nist.gov/publications/occupant-behavior-egress-and-emergency-communication-federal-building-and-fire-safety-0.
4. Boyce, K.E., David Purser, and T. Shields. 2012. “Experimental Studies to Investigate Merging Behaviour in a Staircase.” Fire and Materials 36 (August). https://doi.org/10.1002/fam.1091.
5. Galea, E.R., G. Sharp, and P.J. Lawrence. 2008. “Investigating the Representation of Merging Behavior at the Floor—Stair Interface in Computer Simulations of Multi-Floor Building Evacuations.” Journal of Fire Protection Engineering 18 (4): 291–316. https://doi.org/10.1177/1042391508095092.
6. Hunt, Aoife, Edwin R. Galea, and Peter J. Lawrence. 2013. “An Analysis and Numerical Simulation of the Performance of Trained Hospital Staff Using Movement Assist Devices to Evacuate People with Reduced Mobility.” Fire and Materials 39 (4): 407–29. https://doi.org/10.1002/fam.2215.
7. IMO. 2016. “IMO Guidelines for Evacuation Analysis for New and Existing Passenger Ships. MSC.1/Circ.1533.” 4 Albert Embankment, London, Great Britain: International Maritime Organization.
8. Klote, J. H., and D. M. Alvord. 1992. “Feasibility and Design Considerations of Emergency Evacuation by Elevators.” NISTIR. National Institute of Standards and Technology, Gaithersburg, Maryland, USA, and George Mason University, Fairfax, Virginia, USA. http://bit.ly/3aOfSiJ.
9. Korhonen, Timo. 2018. Fire Dynamics Simulator with Evacuation: FDS+Evac, Technical Reference and User’s Guide. Sixth Edition. VTT Technical Research Centre of Finland: VTT. http://virtual.vtt.fi/virtual/proj6/fdsevac/documents/FDS+EVAC_Guide.pdf.
10. SFPE. 2016. SFPE Handbook of Fire Protection Engineering. 5th ed. Springer-Verlag New York. https://www.springer.com/us/book/9781493925643.
11. ———. 2019. SFPE Guide to Human Behavior in Fire. 2nd ed. Springer International Publishing. https://www.springer.com/gp/book/9783319946962.
12. Zhang, J, W Klingsch, A Schadschneider, and A Seyfried. 2011. “Transitions in Pedestrian Fundamental Diagrams of Straight Corridors and T-Junctions.” Journal of Statistical

Mechanics: Theory and Experiment 2011 (06): P06004. https://doi.org/10.1088/1742-5468/2011/06/p06004.

13. Zhang, Jun, Wolfram Klingsch, Tobias Rupprecht, Andreas Schadschneider, and Armin Seyfried. 2011. “Empirical Study of Turning and Merging of Pedestrian Streams in T-Junction.”
14. Zhang, Jun, Wolfram Klingsch, Andreas Schadschneider, and Armin Seyfried. 2011. “Ordering in Bidirectional Pedestrian Flows and Its Influence on the Fundamental Diagram.”
15. Zhang, Jun, and Armin Seyfried. 2013. “Empirical Characteristics of Different Types of Pedestrian Streams.” Procedia Engineering 62: 655–62. https://doi.org/10.1016/j.proeng.2013.08.111.