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

Руководство по верификации и валидации расчётного ядра

FireEvac

программа моделирования эвакуации людей при пожаре · входит в программный комплекс FireRisk
расчётное ядро fse, сборка 77d706d от 17.09.2026

21.09.2026

Дисклеймер

ИП Карькин Илья Николаевич не даёт выраженных или невыраженных гарантий пользователям программы FireEvac и программного комплекса FireRisk и не несёт ответственности за их использование. Пользователи программного комплекса несут единоличную ответственность в соответствии с федеральными законами за определение адекватности использования программ для каких-либо целей и за выводы, сделанные по полученным результатам. Они также отвечают за любые предпринятые действия или бездействие в результате расчётов, выполненных при помощи данных программных средств.

Пользователи предупреждены, что программа FireEvac и программный комплекс FireRisk должны использоваться только компетентными специалистами в расчёте пожарного риска. Программы предназначены только для квалифицированных пользователей. Программное обеспечение представляет собой компьютерные модели, которые могут работать корректно или некорректно применительно к конкретному набору исходных данных. Отсутствие точных предсказаний может привести к ошибочным выводам. Все результаты должны быть оценены компетентным специалистом.

Содержание

1 Введение **6**
1.1 Назначение документа и кому он адресован 6
1.2 Что верифицируется 6
1.3 Термины и обозначения 6
1.4 Правила оценки результатов 9
1.5 Нормативная и методическая база 10
1.6 Устройство документа 13
2 Расчётная модель и её проверка **15**
2.1 Состав модели и порядок проверки 15
2.2 Представление человека и исходные условия 17
2.3 Движение в помещениях и коридорах 21
2.4 Взаимодействие людей и обход препятствий 31
2.5 Слияние потоков 39
2.6 Проёмы и сужения 45
2.7 Лестницы и пандусы 61
2.8 Выбор выхода и маршрута 68
2.9 Движение маломобильных людей 73
2.10 Эвакуация по совокупности участков 79
3 Общие выводы **84**
3.1 Две конфигурации расчёта и порядок применения 84
3.2 Обоснование базовой конфигурации с пределом потока дверного проёма 85
3.3 Согласование с экспериментом 85
3.4 Соответствие методике № 1140 86
Приложение Г1. Тесты ISO 20414: четырнадцать базовых тестов **88**
Г1.1 Источник и данные 88
Г1.2 Расчётная модель и конфигурации расчёта 90
Г1.3 Результаты и анализ 91
Г1.4 Выводы 117
Приложение Г2. Базовые зависимости методики № 1140 ..... **118**
Г2.1 Источник и данные 118
Г2.2 Расчётная модель и конфигурации расчёта 119
Г2.3 Результаты и анализ 124
Г2.4 Выводы 134
Приложение Г3. Задачи пособия Академии ГПС: участок 20 × 2 м с проёмами 1,2 и 0,8 м (задачи 1–27) **136**
Г3.1 Источник и данные 136
Г3.2 Расчётная модель и конфигурации расчёта 138
Г3.3 Результаты и анализ 141
Г3.4 Выводы 148
Приложение Г4. Задачи пособия Академии ГПС на слияние потоков (задачи 28–42) **150**

Г4.1 Источник и данные ... 150
Г4.2 Расчётная модель и конфигурации расчёта ... 151
Г4.3 Результаты и анализ ... 153
Г4.4 Выводы ... 156

Приложение Г5. Тесты IMO MSC.1/Circ.1533 и NIST TN 1822: тест IMO 9 ... 158
Г5.1 Источник и данные ... 158
Г5.2 Расчётная модель и конфигурации расчёта ... 161
Г5.3 Результаты и анализ ... 164
Г5.4 Выводы ... 165

Приложение Г6. Опыты Jülich: казарма Дюссельдорф 2006 и коридор 2009 ... 166
Г6.1 Источник и данные ... 166
Г6.2 Расчётная модель и конфигурации расчёта ... 168
Г6.3 Результаты и анализ ... 169
Г6.4 Выводы ... 181

Приложение Г7. Лабораторные ряды по ширине проёма: Seyfried 2005 и Kretz 2006 ... 182
Г7.1 Источник и данные ... 182
Г7.2 Расчётная модель и конфигурации расчёта ... 186
Г7.3 Результаты и анализ ... 188
Г7.4 Выводы ... 193

Приложение Г8. Узлы Jülich: T-слияние, поворот и сужение ... 194
Г8.1 Источник и данные ... 194
Г8.2 Расчётная модель и конфигурации расчёта ... 198
Г8.3 Результаты и анализ ... 201
Г8.4 Выводы ... 205

Приложение Г9. Натурные опыты Академии ГПС МЧС России и профиль курсанта ... 206
Г9.1 Источник и данные ... 206
Г9.2 Расчётная модель и конфигурации расчёта ... 208
Г9.3 Результаты и анализ ... 213
Г9.4 Выводы ... 216

Приложение Г10. Учебные эвакуации NIST по лестницам: четыре здания, десять лестничных клеток ... 217
Г10.1 Источник и данные ... 217
Г10.2 Расчётная модель и конфигурации расчёта ... 222
Г10.3 Результаты и анализ ... 225
Г10.4 Выводы ... 230

Приложение Г11. Российские натурные опыты по проёму: Милинский, Копылов, Предтеченский–Тарасова ... 231
Г11.1 Источник и данные ... 231
Г11.2 Расчётная модель и конфигурации расчёта ... 234
Г11.3 Результаты и анализ ... 238
Г11.4 Выводы ... 240

Приложение Г12. Маломобильные группы: скорости, интенсивность через проём, кресло-коляска ... 241
Г12.1 Источник и данные ... 241
Г12.2 Расчётная модель и конфигурации расчёта ... 249

Г12.3 Результаты и анализ 251
Г12.4 Выводы 256
Приложение Г13. Гидравлическая модель SFPE: второе применение режима УАМ 257
Г13.1 Источник и данные 257
Г13.2 Расчётная модель и конфигурации расчёта 259
Г13.3 Результаты и анализ 261
Г13.4 Выводы 263
Приложение Д. Сопоставление с Pathfinder по корпусу моделей 264
Д.1 Назначение 264
Д.2 Корпус 105 моделей 264
Приложение Е. Параметры ядра 268
Приложение Ж. Архив моделей тестов 279
Список литературы 286

1 Введение

1.1 Назначение документа и кому он адресован

Документ описывает расчётное ядро программы FireEvac: математическую модель движения людей при эвакуации, её реализацию и результаты проверки. Описание дано в объёме, достаточном, чтобы читатель (инженер по пожарной безопасности, эксперт или проверяющий орган, разработчик ядра) понял, что считает программа, и повторил проверки по приложенным файлам. Каждое техническое решение сопровождается тем, чем оно проверено, а каждый результат проверки отсылает к проверяемому механизму модели.

Документ отвечает на три вопроса:

1. Расчёт соответствует методике МЧС России № 1140 [1]: программа воспроизводит величины её таблиц и формул и аналитические решения, построенные по ним.
2. Расчёт согласуется с экспериментом: модель движения воспроизводит натурные и лабораторные опыты, когда её параметры отвечают условиям опыта.
3. Конфигурация расчёта пожарного риска с пределом потока дверного проёма обоснована: известно, в какую сторону и насколько отклоняется расчётное время эвакуации при исходных данных методики.

1.2 Что верифицируется

Предмет документа – консольное **расчётное ядро** `fse`: оно читает входной файл модели, моделирует движение людей и записывает файлы результатов. Граница предмета проходит по этим файлам: редактор модели, импорт чертежей, библиотека профилей как объект интерфейса и расчёт пожарного риска описаны в документации программ FireEvac и FireRisk.

Назначение ядра – моделирование движения людей. Каждый человек представлен агентом, который перемещается по помещениям, коридорам, проёмам и лестницам, выбирает путь и расходится с другими людьми и ограждениями. Расчёт времени эвакуации при пожаре по индивидуально-поточной модели приложения № 7 методики [1] – одно из применений такой модели. Тем же ядром без изменений воспроизводятся натурные и лабораторные опыты по движению людей, и на этом построена валидационная часть документа.

1.3 Термины и обозначения

В документе используются термины из следующих источников: термины верификации и валидации взяты из стандарта [3], термины движения людей – из методики [1] и работ [9].

Термины стандарта [3]:

- **Верификация** [3, 3.25] – подтверждение того, что реализация метода расчёта точно отражает его концептуальное описание и решение. В документе расчёт сравнивается с аналитическими решениями, таблицами методики и критериями тестов ISO 20414, IMO и NIST.
- **Валидация** [3, 3.24] – степень, в которой метод расчёта отражает реальность. В документе это сравнение с данными натурных и лабораторных экспериментов.
- **Калибровка модели** [3, 3.3] – корректировка её параметров с опорой на экспериментальные данные. Ни верификацией, ни валидацией она не служит. В документе калибровка выполняется заменой

отдельных параметров базовой конфигурации значениями, измеренными в опыте или отвечающими его условиям. Расчёт с такими параметрами назван откалиброванной конфигурацией расчёта.

- **Метод расчёта** [3, 3.2] – здесь ядро `fse` с его моделью движения.
- **Значение по умолчанию** [3, 3.6] – величина параметра, применяемая, когда пользователь не задал иного (приложение Е).
- **Эталонные данные** [3, разд. 6] – аналитическое решение, критерий теста ISO 20414, IMO или NIST либо измерения опыта, независимые от разработки метода и служащие для сравнения.
- **Полнота данных опыта** – наличие в источнике сведений, нужных, чтобы поставить расчёт, не задавая недостающие величины произвольно.

Термины методики [1]:

- **Индивидуально-поточная модель** – модель приложения № 7 [1]: движение каждого агента считается отдельно, а величины людского потока получаются как результат такого расчёта.
- **Упрощённая аналитическая модель (УАМ)** – модель приложения № 6 [1]: время эвакуации складывается из времён движения по участкам пути, а интенсивность движения на каждом участке определяется плотностью потока и ограничена предельными значениями табл. П2.8.
- **Группы мобильности М0…М4** [1, табл. П2.6, П2.7] – М0 без ограничений подвижности (профили М0-1…М0-7). Группы М1…М4 маломобильные, включая кресло-коляску и транспортируемых.
- **Участок пути** – часть постоянной ширины и одного вида: горизонтальный путь, лестница вниз или вверх, пандус, дверной проём.
- **Время начала эвакуации** – промежуток от возникновения пожара до момента, когда человек начинает двигаться (приложение № 4 [1]). Оно задаётся каждому агенту.
- **Расчётное время эвакуации** отсчитывается от начала движения до выхода из здания последнего человека (приложение № 7, п. 1 [1]).

Термины программы и документа:

- **Опыт** – проверяемая постановка: натурный или лабораторный эксперимент либо расчётный тест с аналитическим решением или критерием теста ISO 20414, IMO или NIST. Слово «эксперимент» относится к натурным и лабораторным опытам, «тест» – к расчётным: тестам ISO 20414, IMO и NIST, задачам пособия, примерам SFPE, базовым зависимостям методики.
- **Агент** – расчётное представление одного человека: проекция, скорость свободного движения, профиль группы мобильности, текущее состояние. Слова «человек» и «люди» относятся к участникам опытов и к численности.
- **Профиль группы мобильности** – параметры движения агента одной из групп М0…М4 [1]: V_0, кривые «скорость–плотность» по видам пути, габариты и площадь проекции, время разгона и прочие. В тексте он назван коротко профилем. Библиотека профилей программы содержит профили М0-1… М0-7, М1…М4 и транспортируемых, каждый в летнем и зимнем варианте (приложение Г2).
- **Проекция** – горизонтальный габарит агента в плане: круг, для кресла-коляски и средств транспортировки многоугольник, площадью f по методике. Её наименьший размер назван **проходным диаметром**, и им агент расходится со стенами и препятствиями.
- **Кривая «скорость–плотность»** – зависимость скорости агента от локальной плотности, заданная профилем таблицей.
- **Категория условий движения** различает комфортное, спокойное, активное и повышенной активности. Шкала категорий по V_0 приведена в разделе 2.2.
- **Расчётная сетка** – поверхность движения из треугольников.

- **Участок** (узел сетки) обозначает именованную часть поверхности движения: помещение, лестничный марш, площадку.
- **Проём** – отверстие в стене. Во входном файле он задан объектом модели **дверь**, а поток через него замеряется на линии, названной **створом**.
- **Режим УАМ** – режим модели проёма, в котором верхняя граница удельного потока через створ двери не задаётся настройкой, а вычисляется по ходу расчёта по упрощённой аналитической модели приложения № 6 [1] для каждой двери и её состояния. По умолчанию выключен, реализация описана в разделе 2.6.
- **Предел потока проёма** – настройка, ограничивающая сверху удельный поток через створ двери. Наибольшее его значение, измеренное в опыте, названо **ёмкостью створа**. У модели проёма два режима работы: предел задан значением настройки (по умолчанию) либо включён режим УАМ.
- **Базовая конфигурация расчёта** – конфигурация, применяемая при расчёте пожарного риска по методике № 1140. Профиль группы мобильности назначен по контингенту и классу функциональной пожарной опасности [1, табл. П2.3, П2.4] с табличными параметрами [1, табл. П2.5–П2.7]. Предел потока проёма 1,42 чел/(с·м) [1, табл. П2.8] действует на объектах «дверь», которые задаются на проёмах в стенах и на выходе из расчётной области. На границах расчётных участков объекты дверей не ставятся. Режим УАМ выключен, остальные параметры имеют значения по умолчанию (приложение Е). В расчётных тестах параметры движения задаёт источник теста. Расчёт ведётся по индивидуально-поточной модели приложения № 7 с нормативными исходными данными.
- **Откалиброванная конфигурация расчёта** – базовая, в которой отдельные параметры заменены значениями, измеренными в опыте или отвечающими его условиям. Заменяется профиль: на составленный из измеренных в опыте скорости свободного движения и кривой «скорость–плотность» либо на профиль библиотеки, V_0 которого отвечает измеренной в опыте категории условий движения [9, табл. 3.5]; заменяется и проекция по антропометрии участников. Предел потока проёма принимается по ёмкости створа, измеренной в опыте, либо не задаётся. Режим УАМ включается, когда эталон вычислен по упрощённой аналитической или гидравлической модели. В задачах слияния на границах участков действует предел по виду пути 2,25 чел/(с·м). Каждая замена названа в приложении с источником значения. Такой расчёт показывает, воспроизводит ли модель движения явление при исходных данных опыта.
- **Расстановка** – начальное размещение агентов. Её случайные величины определяются **начальным числом расстановки**.

Таблица 1. Обозначения, принятые в документе

Обозначение	Смысл	Единица
b	ширина проёма, створа, участка пути	м
Δ	отклонение расчёта от эталона со знаком: расчёт − эталон либо (расчёт − эталон)/эталон	с или %
D	плотность людского потока: сумма площадей горизонтальных проекций людей на площадь занимаемого участка пути	м²/м² (методика) или чел/м² (расчёт); D[м²/м²] = D[чел/м²]·f
D_0	порог свободного движения (для М0-3 – 0,51 чел/м²)	чел/м²
$D_{расст}$	плотность начальной расстановки агентов в модели	чел/м² или м²/м²
V_0	скорость свободного движения – скорость при плотности не выше порога D_0 (табл. П2.6, П2.7 [1])	м/мин (в расчёте – м/с)
V(D)	скорость при плотности D по кривой «скорость–плотность»	м/мин
q	интенсивность движения, величина методики; связь с удельным потоком J = q/(60·f)	м/мин
J	удельный поток через створ	чел/(с·м)
Q	поток створа	чел/с
f	площадь горизонтальной проекции человека (табл. П2.5 [1])	м²
ERD, EPC, SC	меры согласия расчётной и натурной кривых прибытия; определения и пороги – подраздел 1.4	–

Единицы: удельный поток в чел/(с·м), интенсивность методики в м/мин, плотность в чел/м². Плотность в м²/м² приводится только там, где так задана постановка источника, с переводом в скобках.

1.4 Правила оценки результатов

Для верификационных тестов (формулы и таблицы методики № 1140, задачи пособия Академии ГПС [10], примеры гидравлической модели SFPE [36], тесты ISO 20414 [5], IMO [6] и NIST [41]) принят допуск **±10 %**, как у авторов пособия [10]. Эталон таких тестов вычислен и случайности не содержит. Для валидационных экспериментов установлен допуск **±20 %**, поскольку их эталон измерен и имеет собственный разброс. Верификации посвящены приложения Г1…Г5 и Г13, валидации – Г6…Г12. Собственный критерий источника приводится в приложении для сведения: ±17 % NIST [45], ±25 % опытов Академии ГПС (приложение Г9), меры ERD, EPC и SC по ISO 20414, «примерно удвоение» IMO 9. Вывод о допуске делается по допуску документа.

Отклонение считается со знаком: Δ = расчёт − эталон, в процентах Δ = (расчёт − эталон)/эталон, и приводится при каждом числе, включая обе границы диапазона. По времени положительное отклонение означает, что расчёт даёт оценку сверху: расчётное время эвакуации больше эталонного. При отрицательном отклонении расчётное время эвакуации меньше эталонного, и это оценка снизу. По удельному потоку и скорости смысл знака обратный: расчётный поток меньше измеренного означает большее расчётное время эвакуации. Для расчёта пожарного риска знак важен не меньше величины: там, где расчёт даёт оценку снизу, требуется осторожность, и такие постановки перечислены в разделе 3.

У каждого опыта две конфигурации расчёта. Сначала считается базовая, а если условия опыта отличаются от расчётного случая методики, то дополнительно и откалиброванная. По базовой конфигурации судят о применимости для расчёта пожарного риска: величина и знак отклонения, постановки, требующие осторожности. По откалиброванной видно, воспроизводит ли модель движения явление, когда её параметры отвечают условиям опыта. Каждая замена параметра при калибровке названа в приложении с источником значения. Конфигурации назначаются до расчёта и по результату сравнения с эталоном не изменяются.

В базовой конфигурации профиль назначается по контингенту: класс функциональной пожарной опасности и состав людей определяют группу мобильности [1, табл. П2.3, П2.4], а её параметры берутся из таблиц [1, табл. П2.6, П2.7]. Категория условий движения при расчёте пожарного риска – «повышенной активности» [10, с. 6]. В откалиброванной конфигурации, где воспроизводится не эвакуация при пожаре, профиль отвечает измеренным условиям опыта. Если измерены скорость свободного движения и кривая «скорость–плотность», профиль составляется из них при табличной площади проекции (опыты Jülich, приложения Г6 и Г8). Если измерена только скорость свободного движения, по ней определяется категория условий движения [9, табл. 3.5] и принимается профиль библиотеки этой категории с ближайшим V_0. От профиля контингента он отличается не только скоростью, но и коэффициентом a, порогом D_0 и площадью проекции f, и это отличие также влияет на результат.

Валидационная часть [5] оценивает согласие расчёта с опытом тремя мерами функционального анализа [44], сведёнными в [41] (уравнения 6, 9 и 10) и откалиброванными на наборах [40;42]. Натурные значения ряда обозначены **E**, расчётные в тех же точках **m**. Обе зависимости доли вышедших от времени приводятся к общей сетке с шагом 5 с, от сигнала тревоги до более позднего из двух завершений, а шаг секущей для SC равен 10 точкам. Меры приводятся в приложениях Г6…Г10 дополнительно к допуску ±20 %.

Таблица 2. Меры согласия расчётной и натурной кривых прибытия и пороги приёмки

Мера	Определение	Что показывает	Порог [43]
ERD – относительная разность евклидовых норм	$\|E - m\| / \|E\|$	отклонение расчётной кривой от натурной по величине	⩽ 0,45
EPC – проекционный коэффициент	$\langle E, m\rangle / \|m\|^2$	во сколько раз расчётная кривая в среднем ниже или выше натурной (меньше единицы – выше)	0,6…1,4
SC – косинус секущих	наклоны секущих, построенных с постоянным шагом по точкам ряда	согласие формы кривых	⩾ 0,6

1.5 Нормативная и методическая база

Методика МЧС России № 1140 утверждена приказом МЧС от 14 ноября 2022 г. № 1140 [1]. Для расчёта времени эвакуации она допускает три модели (п. 19): упрощённую аналитическую по приложению № 6, индивидуально-поточную по № 7 и имитационно-стохастическую по № 8. FireEvac реализует индивидуально-поточную, а упрощённую аналитическую воспроизводит режимом УАМ (раздел 2.6).

Таблица 3. Формулы, таблицы и правила методики № 1140, входящие в расчёт

Источник	Что задаёт
(П2.1)	зависимость скорости от плотности: $V = V_0$ при $D \leqslant D_0$ и $V = V_0 \cdot (1 - a \cdot \ln(D/D_0))$ при большей плотности, с коэффициентом a и порогом D_0 по видам пути
(П2.2), (П2.3), (П2.4)	$q = D \cdot V$; $q_{max} = D_{qmax} \cdot V$; $D_{qmax} = D_0 \cdot e^{1/a - 1}$
табл. П2.5	габариты и площадь проекции человека, кресла-коляски и средств транспортировки
табл. П2.6, П2.7	V_0, D_0 и a групп М0-1…М0-7 и М1…М4
табл. П2.8	предельные q_{max} и q_{Dmax} по видам участка пути
табл. П2.9, П2.10	скорость переноски на носилках и число рейсов персонала
приложение № 4	время начала эвакуации
приложение № 5	правила расчётной схемы: учитываемые пути и выходы, блокирование очагом выхода с наибольшим потоком, истинная длина марша, неучёт влияния поворотов
приложение № 7	одномерная координатная схема (П7.1, П7.2, П7.4), скопление рядами с шагом 0,25 м (п. 11), расчётное время эвакуации по выходу последнего человека (п. 1)

Приложением № 7 не определены выбор выхода, отбор «группы из n человек», разрешение конфликтов при встрече и слиянии и поворот габарита проекции в плане. Параметры движения методики восходят к таблице 2 приложения 2 [2] и к исследованиям людских потоков [7;8]. Величины q_{max} и q_{Dmax} табл. П2.8 перенесены из стандарта [2] дословно, а зависимость скорости от плотности заменена формулой (П2.1) с коэффициентами по группам. Табличные пределы и формула (П2.1) согласованы для группы М0-3, для остальных групп могут расходиться. Числа методики входят в расчёт через профили групп мобильности, которые задаются во входном файле, а не в программном коде (приложение Е). Порядок выбора профиля описан в разделе 2.2.

Таблица 4. Источники верификации и валидации и их роль в документе

Род проверки	Источник	Что содержит	Роль в документе
верификация	Пособие «Тестовые задачи для проверки точности моделирования времени эвакуации людей в случае пожара» Академии ГПС МЧС России [10]	42 задачи с аналитическим эталоном по формулам методики: участок 20 × 2 м без проёма и с проёмом 1,2 и 0,8 м при начальной плотности 0,1…0,9 м²/м², Т-образное слияние потоков; допуск авторов ±10 %	отечественный источник аналитических решений в отсутствие национального стандарта на испытания программ моделирования эвакуации (приложения Г3, Г4)
верификация	ГОСТ Р 57639-2017 «Пожарно-технический анализ. Часть 1. Валидация и верификация методов расчёта» [3]	рамочный стандарт (модифицированный по отношению к ИСО 16730-1:2015): термины, требования к документации, процедуры открытой и слепой валидации, форма отчёта; тестовых задач по эвакуации не содержит	термины, состав документации, форма отчёта
верификация	ISO 20414:2020 [5]	отраслевой протокол: 21 верификационный тест (13 базовых обязательны), девять типов компонентной валидации, глобальная валидация по типам зданий, методы анализа результатов и шаблон отчёта	протокол проверок и меры согласия (приложение Г1)
верификация	IMO MSC.1/Circ.1533 [6], NIST TN 1822 [41], RiMEA 4.1.1 [55]	исходные наборы тестов, вошедшие в ISO 20414	источники постановок (приложение Г5); требование первых двух объявлять непроведённые тесты выполнено в приложении Г5
верификация	SFPE: гидравлическая модель движения [36;37], руководство по поведению людей при пожаре [38], справочник [54]	аналитические примеры и потоковые зависимости, предельные потоки проёмов	гидравлическая и упрощённая аналитическая модели построены одинаково и различаются записью верхнего предела интенсивности, поэтому режим УАМ сверяется с обеими (приложение Г13)
валидация	Опыты Forschungszentrum Jülich: казарма Дюссельдорф 2006 и коридор 2009 [27;28; 30;35]	13 опытов прохода через проём 0,9… 2,5 м и 28 постановок коридора с сужениями входа и выхода по 61…351 человеку; траектории каждого участника	время прохода последнего и измеренная ёмкость створов; кривые прибытия для мер ISO 20414 (приложение Г6)
валидация	Лабораторные ряды по ширине проёма [27;34;32]	удельный поток через проём 0,4…5,0 м, 30 точек трёх рядов	зависимость ёмкости створа от ширины (приложение Г7)
валидация	Узлы Jülich: Т-образное слияние, поворот, сужение [31; 35]	измеренная ёмкость семи узлов разного типа	пропускная способность узлов без дверного полотна (приложение Г8)
валидация	Натурные опыты Академии ГПС МЧС России [13;25;26]	эвакуация курсантов из комнаты 2 × 2 м через проём 0,88 м, из коридора 20 × 2 м и через проём 0,8 м; 13 точек; антропометрия участников	время выхода и ёмкость створов при известной проекции участников (приложение Г9)
валидация	Учебные эвакуации по лестницам NIST [45;46;47]	четыре офисных здания 10…31 этаж, десять лестничных клеток, около 3 800 человек, поштучные замеры	время выхода населения лестничной клетки, скорость на марше и площадке (приложение Г10)

Род проверки	Источник	Что содержит	Роль в документе
валидация	Российские натурные опыты по проёму [18;19;23;24]	наибольший удельный поток через проёмы 0,7…2,5 м в манеже и при наблюдениях в зданиях; 15 точек	ёмкость створа по отечественным данным, на которых построена табл. П2.8 (приложение Г11)
валидация	Натурные ряды маломобильных групп [16;20; 21;22]	скорости свободного движения, удельный поток через проём 1,2 м и время прохода проёма креслом-коляской для групп М1…М4	параметры профилей маломобильных групп против измерений (приложение Г12)

Модель относится к классу непрерывных индивидуально-поточных с выбором направления по взвешенным штрафам (англ. steering behaviours). В неё вошли правила «seek», «separation», «avoid» и их сложение [50], выбор из набора пробных направлений по минимуму штрафа [51] и контуры личного пространства для локальной плотности [53]. Сглаживание пути по сетке выполняется по [52], а области, по которым измеряются скорость и плотность, строятся методом Вороного [33]. Отечественные зависимости движения людских потоков взяты из работ [7;8;9].

Таблица 5. Требования стандартов к документированию, верификации и валидации и место их выполнения

Требование	Где выполнено
Теоретические основы, уравнения и допущения модели [3, 4.2.1–4.2.2;5, 4.2]	Подраздел 2.1; шаг «Реализация в модели» каждого раздела главы 2
Ограничения и область применимости [3, 4.2.2]	Выводы приложений Г1…Г13 (блоки Гп.4)
Значения параметров по умолчанию и их происхождение [5, 4.2]	Приложение Е
Описание проведённой верификации и валидации, примеры с решением [3, 4.2.3–4.2.4]	Шаги «Верификация» и «Валидация» девяти разделов главы 2; приложения Г1…Г13, Ж
Верификация базовых компонентов модели [5, 5.2]	Приложения Г1, Г2, Г5
Компонентная и глобальная валидация по натурным данным [5, 6.3–6.4]	Приложения Г6…Г12
Открытая и слепая валидация; независимость эталонных данных [3, 5.3.2, 6.1]	Приложения Г6…Г12, блоки Г6.1…Г12.1 (источник и полнота данных)
Форма отчёта о тесте: постановка, ожидаемый результат, результат, расхождение [5, прил. А]	Единая сетка из четырёх блоков приложений Г1…Г13
Оценка неопределённости и воспроизводимости [5, 9]	Раздел 2.10; приложение Г2
Воспроизводимость независимой стороной [3, 4.2.3]	Приложение Ж

1.6 Устройство документа

Основной текст – глава 2. Её первый раздел описывает состав модели и порядок проверки. Девять следующих разделов посвящены моделируемым процессам: от представления человека и исходных условий до эвакуации по совокупности участков. Каждый раздел о процессе построен по пяти шагам в одном порядке. «Явление» описывает, что происходит в действительности и какими величинами это задаёт методика. «Реализация в модели» показывает, как это воспроизводит ядро. «Верификация» сравнивает расчёт с аналитическими решениями и критериями тестов ISO 20414, IMO и NIST, «Валидация» – с экспериментом, «Вывод» подводит итог.

Раздел 3 отвечает на три вопроса Введения: соответствие методике, согласование с экспериментом при откалиброванной конфигурации и обоснование базовой с пределом потока дверного проёма. Полные таблицы, планы моделей, кадры расчётов и разбор расхождений вынесены в приложения Г1…Г13, по

одному на опыт или набор тестов. Все они построены по одной сетке из четырёх блоков: источник и данные, расчётная модель и конфигурации расчёта, результаты и анализ, выводы. Приложение Д сопоставляет формат модели с форматом программы, применяемой в отечественной практике для тех же расчётов. Приложение Е содержит параметры ядра. Приложение Ж перечисляет модели тестов, поставляемые с программой одним архивом.

Графики построены по одному образцу: по оси абсцисс отложен параметр постановки, по оси ординат – сравниваемая величина или отклонение от эталона. Полосой показан допуск, а знаками расчёты в базовой и откалиброванной конфигурациях. Нумерация рисунков и таблиц сквозная.

2 Расчётная модель и её проверка

2.1 Состав модели и порядок проверки

FireEvac реализует индивидуально-поточную модель приложения № 7 методики [1] на непрерывной двумерной расчётной поверхности. Каждый агент представляет одного человека и имеет собственные V_0, кривую «скорость–плотность», проекцию и поведение. Выход и направление шага определяются для него отдельно. Людской поток в такой модели получается сам. Скопления, снижение скорости в плотном потоке и ограничение потока в проёмах возникают из взаимодействия агентов между собой и с ограждениями и из предельных зависимостей методики. Результат расчёта – время выхода последнего человека, а также потоки через створы, плотности и скорости в заданных областях, по которым расчёт сравнивается с методикой и экспериментом.

Поверхность движения разбита на треугольники. Треугольник принадлежит участку (помещению, лестничному маршу, площадке) и несёт вид поверхности: горизонтальный путь, лестница, пандус. Соседство определяется по общим рёбрам, ребро без соседа – стена. Двери и проёмы – рёбра со створом шириной b. На нём действует предел потока проёма. Результат зависит от того, оформлена ли граница участка дверью. Объект «дверь» задаётся на проёме в стене и на выходе из расчётной области, а границы участков одного коридора, перекрёстки и сужения без дверного полотна стыкуются по рёбрам сетки. Оба случая разобраны в разделах 2.6 и «Слияние потоков». Нумерацию вершин и треугольников ядро приводит при загрузке к каноническому виду, поэтому результаты для одной геометрии, записанной по-разному, совпадают полностью.

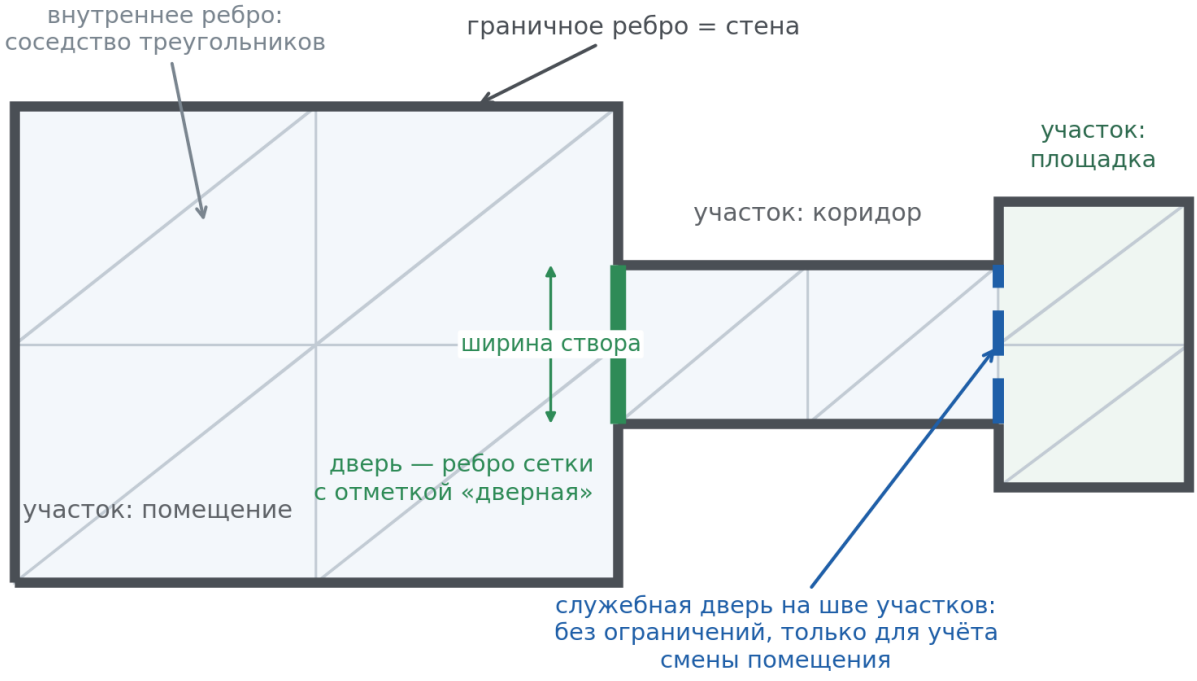


Рисунок 1. Фрагмент расчётной сетки: треугольники, граничные рёбра-стены, створ двери на проёме в стене и служебная дверь на границе участков

Расчёт выполняется с постоянным шагом 0,025 с. Решение о направлении и желаемой скорости агент пересматривает каждые 0,1 с. Перемещение, проверка касаний и учёт дверей выполняются на каждом шаге. Расчёт заканчивается, когда все агенты завершили поведение, либо по достижении предела модельного времени (по умолчанию 3600 с). Порядок операций шага описан в разделе 2.10. Входной файл модели текстовый: параметры расчёта, геометрия, проекции, профили и распределения, поведения и агенты, препятствия и сценарные события. Перечень параметров с их значениями по умолчанию составляет приложение Е. Сопоставление с форматом программы, применяемой в отечественной практике для тех же расчётов, дано в приложении Д.

Эвакуация в расчёте состоит из девяти процессов, каждому посвящён раздел главы. В том же порядке они входят в расчёт реального здания. Сначала описываются люди и их исходное положение, потом движение по участкам пути разного вида и через узлы. Затем идут выбор выхода и особенности маломобильных, а в конце сходятся все механизмы на схеме.

Таблица 6. Процессы модели, разделы главы и чем каждый проверен

Раздел	**Что моделируется**	**Верификация (аналитические решения, критерии тестов ISO 20414, IMO и NIST)**	**Валидация (эксперимент)**
«Представление человека и исходные условия»	проекция и её площадь, скорость свободного движения и её разброс, группы мобильности, расстановка, время начала эвакуации	тесты ISO 1, 5; табл. П2.5–П2.7 методики (приложения Г1, Г2)	натурного ряда по габариту человека нет; ближайшие данные – антропометрия курсантов (Г9) и скорости маломобильных групп (Г12)
«Движение в помещениях и коридорах»	скорость свободного движения на горизонтальном пути, кривая «скорость–плотность», интенсивность q = D·V	тесты ISO 2, 13; коридор 40 м; кривая (П2.1) и потоки через сечения (Г1, Г2); задачи пособия 1–9 (Г3)	коридор Jülich 2009 (Г6); коридор 20 × 2 м Академии ГПС (Г9)
«Взаимодействие людей и обход препятствий»	расхождение, уступка, обгон, обход колонн и углов, встречные потоки	тесты ISO 4, 6, 7 (Г1)	узлы Jülich: поворот и Т-образное слияние (Г8)
«Слияние потоков»	сложение интенсивностей и скопление перед общим участком	задачи пособия 28–42 (Г4)	Т-образный узел Jülich (Г8)
«Проёмы и сужения»	ёмкость створа, предел потока проёма и режим УАМ, очередь перед дверью	тест ISO 11; табл. П2.8 на шести ширинах (Г2); задачи пособия 10–27 (Г3)	казарма Jülich 2006 (Г6); ряды по ширине проёма (Г7); проём и сужение Jülich (Г8); опыты Академии ГПС (Г9); российские опыты по проёму (Г11)
«Лестницы и пандусы»	скорость на марше вверх и вниз, наклонная длина, площадки, пандусы	тесты ISO 3, 10, 12; табл. П2.6–П2.8 для лестниц (Г1, Г2)	десять лестничных клеток офисных зданий NIST (Г10)
«Выбор выхода и маршрута»	выбор выхода по ожидаемому времени, пересмотр решения, закрытие выхода	тесты ISO 8, 9, 17; тест IMO 9 (Г1, Г5)	натурного ряда нет
«Движение маломобильных людей»	профили М1…М4, кресло-коляска, носилки, сопровождение немобильных	табл. П2.5, П2.7, П2.9 (Г2); тест ISO 7 (Г1)	натурные ряды скоростей и потоков маломобильных групп (Г12)
«Эвакуация по совокупности участков»	совместная работа всех механизмов на схеме здания, детерминизм, завершение расчёта	примеры гидравлической модели SFPE (Г13); независимость от шага расчёта (Г2)	лестничные клетки NIST как комплексная схема (Г10)

Каждый раздел о процессе построен по пяти шагам, и назначение каждого шага одно на весь документ.

1. **Явление** – что происходит в действительности, когда люди эвакуируются: какими величинами это описывает методика № 1140, почему это влияет на время эвакуации и что именно будет сравниваться. Шаг нужен, чтобы читатель, не знающий программу, понимал, что проверяется и зачем.
2. **Реализация в модели** – как ядро воспроизводит явление: механизм, величины методики, которые входят в расчёт, и решения расчётчика, влияющие на результат. Имена параметров входного файла в главе не приводятся. Они собраны в приложении Е.
3. **Верификация** – сравнение с аналитическими решениями, таблицами методики и критериями тестов ISO 20414, IMO и NIST при допуске ±10 %. Расчёт выполняется в базовой конфигурации. Там, где эталон вычислен по упрощённой аналитической модели приложения № 6, дополнительно в режиме УАМ (откалиброванная конфигурация). Шаг отвечает на вопрос, правильно ли реализованы формулы и правила методики.
4. **Валидация** – сравнение с данными натурных и лабораторных экспериментов при допуске ±20 %. Приводятся паспорт опыта, итог базовой конфигурации (знак и величина отклонения, доля точек в допуске) и результат откалиброванной с указанием, какой параметр заменён и откуда взято значение. Шаг отвечает на два вопроса: в какую сторону отклоняется расчёт от действительности и воспроизводит ли модель движения явление, когда её параметры отвечают условиям опыта.
5. **Вывод** – что подтверждено, как согласуется с экспериментом, что изменено при калибровке и в каких постановках применение требует осторожности.

Таблицы результатов по каждой точке, планы моделей, кадры расчёта и разбор причин расхождений вынесены в приложения Г1…Г13. В главе остаются диапазоны отклонений, доли точек в допуске и рисунки результата. Определения базовой и откалиброванной конфигураций и правила оценки даны в разделе 1.

2.2 Представление человека и исходные условия

2.2.1 ЯВЛЕНИЕ

Расчёт эвакуации начинается с описания людей, которые будут двигаться, и положения, в котором они находятся в момент начала движения. Человек занимает на плане площадь горизонтальной проекции: для взрослого в летней одежде методика задаёт эллипс 0,46 × 0,28 м площадью 0,10 м² [1, табл. П2.5]. Он идёт со скоростью свободного движения, которая зависит от группы мобильности и вида пути и у разных людей различна [1, табл. П2.6, П2.7]. Движение он начинает спустя время начала эвакуации [1, прил. № 4]. Состав людей (доли групп мобильности М0…М4) определяется классом здания и контингентом
[1, табл. П2.3, П2.4]. Эти величины задаются до расчёта и в его ходе не изменяются, поэтому отклонение в любой из них целиком переносится на расчётное время эвакуации. Проверяется, воспроизводит ли программа табличные значения методики и заданные распределения скоростей и времён начала эвакуации и размещает ли людей с заданной плотностью.

2.2.2 РЕАЛИЗАЦИЯ В МОДЕЛИ

Перечисленные величины ядро хранит в профиле группы мобильности, именованном наборе чисел, который назначается каждому человеку расчётной схемы. Профиль несёт V_0 и её множители для марша лестницы и пандуса, кривые «скорость–плотность» по пяти видам пути, площадь и форму горизонтальной проекции, время разгона и признак немобильности. Библиотека профилей, поставляемая с программой, повторяет строки табл. П2.5–П2.7 методики: профиль М0-3 отвечает взрослым в летней

одежде, профили M1…M4 – маломобильным группам. Перечень величин профиля и значений по умолчанию дан в приложении Е.

Любая величина профиля задаётся либо числом, либо распределением: равномерным, нормальным или логнормальным. Ядро назначает её каждому человеку отдельно, по закреплённому за этим человеком начальному числу, поэтому расчёт остаётся воспроизводимым: повторение той же модели даёт тот же результат (приложение Ж). Тем же способом получает значение время начала эвакуации: расчётная схема назначает его по приложению № 4 методики, а до его наступления агент стоит на месте.

Габарит методики – эллипс 0,46 × 0,28 м площадью f = 0,10 м² [1, табл. П2.5]. Ядро применяет равновеликий круг Ø 0,357 м, поэтому площадь проекции совпадает с методикой, а форма отличается. Радиус проекции 0,178 м задаёт расстояние, на котором агенты расходятся. Ширину узкого места агент оценивает не этим радиусом, а проходным диаметром, равным малой оси эллипса табл. П2.5: 0,28 м в летней одежде и 0,313 м в зимней. Проём агент проходит габаритом методики, а с соседом расходится по кругу, который вдоль пути длиннее эллипса на четверть (0,357 против 0,280 м). Числовые следствия для пропускной способности створа даны в разделе 2.6.

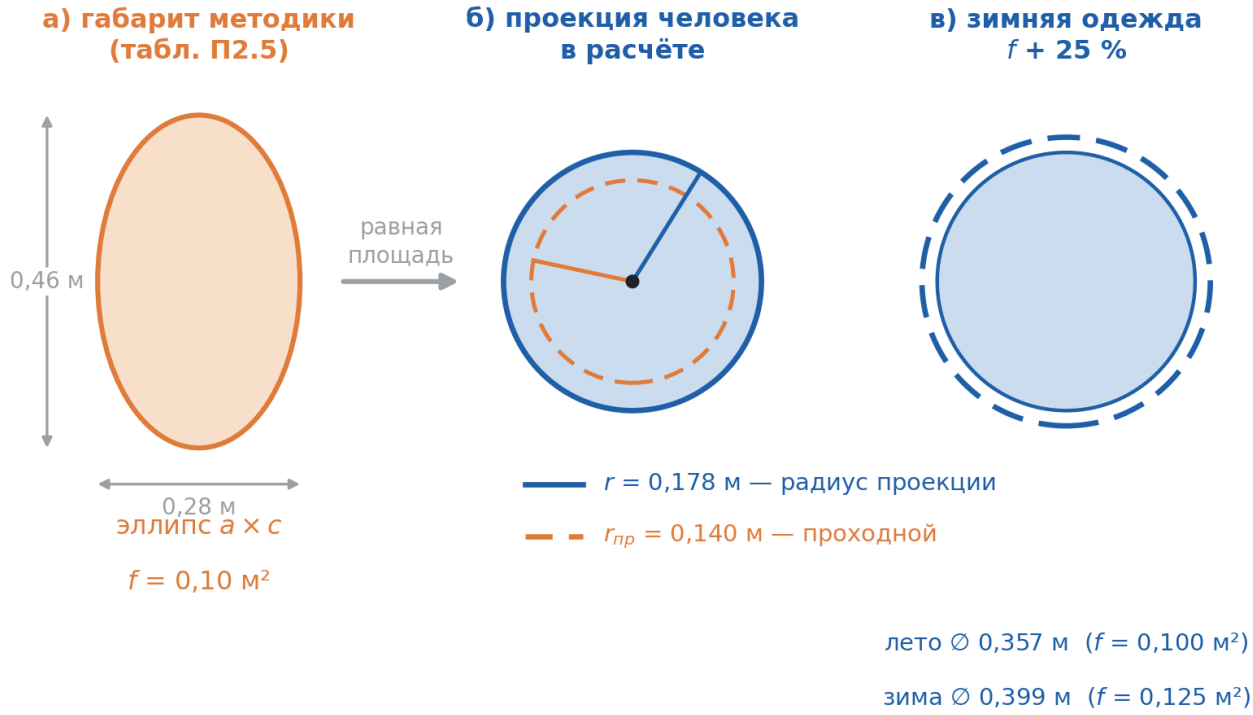


Рисунок 2. Габарит человека по табл. П2.5 методики и равновеликий круг проекции агента: радиус и проходной диаметр летней и зимней одежды

Категория условий движения назначается по обстановке, в которой идут люди, – от комфортного движения до повышенной активности при эвакуации; скорость свободного движения служит её признаком [9, табл. 3.5]. Коэффициенты a и D_0 кривой от неё не зависят [9, табл. 3.6]. Таблица категорий приведена для справки: она нужна там, где расчёт сопоставляется с опытом, а в опыте измерена только скорость свободного движения. Тогда профиль откалиброванной конфигурации выбирается из библиотеки по этой категории. Если измерена и кривая «скорость–плотность», профиль составляется из измеренных величин (приложения Г6 и Г8).

Таблица 7. Категории условий движения по скорости свободного движения [9, табл. 3.5]

Категория	V_0 горизонтального пути, лестницы вниз и проёма, м/мин	V_0 лестницы вверх, м/мин
комфортное	до 49	до 27
спокойное	49…66	27…38
активное	66…90	38…55
повышенной активности	90…120	55…75

При эвакуации принимается категория повышенной активности [10, с. 6]: ей отвечает V_0 = 100 м/мин профиля М0-3, а комфортной – 45 м/мин у М0-7.

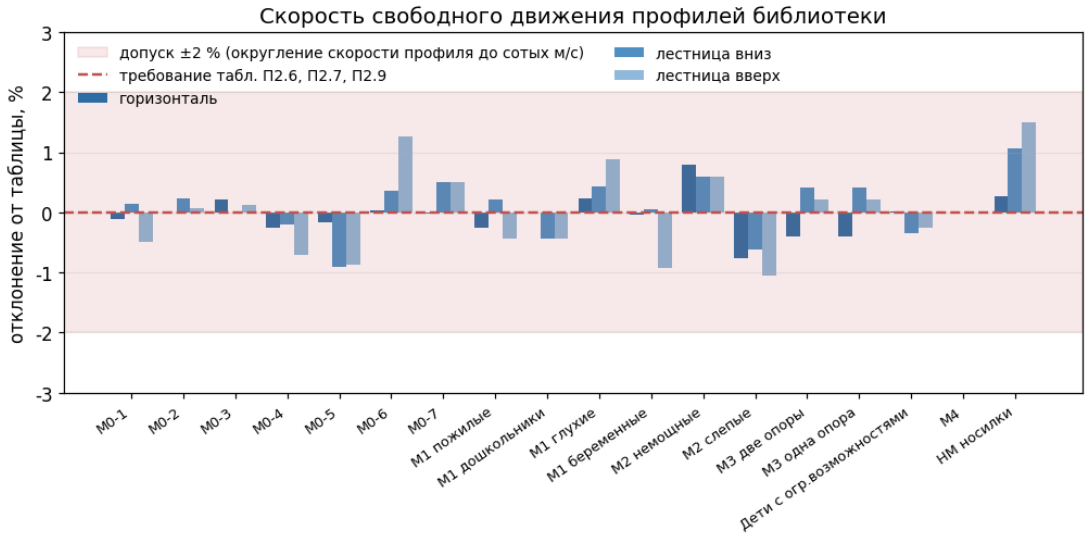
Профиль назначается расчётчиком по контингенту и классу функциональной пожарной опасности здания [1, табл. П2.3, П2.4]. От этого выбора расчётное время эвакуации зависит сильнее, чем от прочих его решений: внутри одной группы М0 разные профили дают разное отклонение от экспериментальных данных (приложения Г11 и Г12). Плотность и способ начальной расстановки задаёт расчётная схема. От них зависит результат на участках без узких мест.

2.2.3 ВЕРИФИКАЦИЯ

Проверяются две группы величин: числа, взятые из таблиц приложения № 2 методики, и правильность воспроизведения заданных распределений. Первые сверяются с самими таблицами, вторые – с тестами 1 и 5 стандарта ISO 20414 [5]. Допуск документа при верификации ±10 %. Для скорости свободного движения он сужен до ±2 %, поскольку профиль хранит скорость округлённой до сотых метра в секунду, а таблица методики выражена в метрах в минуту.

Таблица 8. Проверка параметров агента и воспроизведения распределений: постановки, требование эталона и результат при базовой конфигурации расчёта

Проверка	Постановка	Требование эталона и допуск	Результат
Тесты 1 и 5 ISO 20414 [5] (= IMO 5 и 7, NIST Verif. 1.1 и 2.4), приложение Г1. Воспроизведение распределений времени начала эвакуации и скорости свободного движения	150 назначенных времён по трём кривым (равномерная, нормальная, логнормальная) и 1500 назначенных скоростей по трём кривым; пять расчётов на кривую	принадлежность назначенных значений заданной кривой; числового допуска стандарт ISO 20414 не назначает	значения обоих рядов лежат в области определения своей кривой, границы и среднее совпадают с заданными, гипотеза принадлежности не отвергается ни в одном расчёте (p критерия Колмогорова–Смирнова 0,063…0,910)
Приложение Г2. Скорость свободного движения профилей	27 профилей библиотеки, три вида пути	табл. П2.6, П2.7 и П2.9 методики; допуск ±2 % по округлению скорости до сотых метра в секунду	все значения в допуске: отклонение не более 1,26 % по модулю по табл. П2.6 и П2.7 и +1,50 % у транспортируемых на носилках по табл. П2.9; источник отклонения – округление
Приложение Г2. Площадь и габариты проекции	девять значений площади 0,03…0,96 м², семь пар «летний – зимний» профилей, проекция кресла-коляски	п. 10 приложения № 2, табл. П2.5 и примечание к табл. П2.6 методики	площадь воспроизведена с отклонением не более 0,04 % по модулю; увеличение площади на 25 % в зимней одежде выполняется во всех семи парах; проекция кресла-коляски совпадает с табл. П2.5



Показаны профили без зимних вариантов (они отличаются только площадью проекции) и без специализированных; у кресла-коляски строк «лестница» в табл. П2.7 нет.

Рисунок 3. Отклонение скорости свободного движения профилей библиотеки от табл. П2.6, П2.7 и П2.9 методики по трём видам пути при базовой конфигурации расчёта. Полосой показан допуск ±2 %

Оба теста стандарта ISO 20414 пройдены, а числа профилей отличаются от таблиц методики не более чем на 1,50 % по скорости и 0,04 % по площади проекции: обе величины в допуске. Относится оно к составу библиотеки профилей, а не к расчётному ядру. Проходимость узких мест задаёт проходной диаметр: агент М0-3 в летней одежде проходит проём 0,30 м, в зимней – 0,40 м, но не 0,30 м.

2.2.4 ВАЛИДАЦИЯ

Натурного эксперимента, в котором измерялись бы площадь проекции и габарит человека и сопоставлялись с расчётом, документ не содержит: обе величины заданы таблицами методики и проверены по ним. Ближайшие к измерению данные двух видов – скорости свободного движения шести групп маломобильных людей в приложении Г12 и антропометрия курсантов, измеренная в опытах Академии ГПС (Г9).



Рисунок 4. Скорость свободного движения профилей библиотеки против математических ожиданий, измеренных в натурных наблюдениях маломобильных групп, м/мин. В базовой конфигурации расчёта профиль назначен по группе мобильности участников наблюдения

При базовой конфигурации расчёта, в которой профиль назначен по фактической группе мобильности участников, в допуске ±20 % 4 значения скорости из 6 (−4,1…+5,2 %). Вне допуска два значения: профиль «М3 две опоры» даёт +24,5 % в сравнении с участниками на двух опорах, а «М3 одна опора» +21,1 % против престарелых в смешанном потоке. В обоих случаях расчётная скорость больше измеренной, и расчётное время движения этих групп – оценка снизу. Откалиброванная конфигурация здесь не требуется: профиль участников уже отвечает условиям наблюдения.

Антропометрия курсантов подтверждает, что табличные значения методики описывают всё население, а не отдельный контингент. По измерениям опытов Академии ГПС проходной диаметр курсанта в форменной одежде равен 0,24 м, а проекция составляет 0,08 м² летом и 0,10 м² зимой. Таблица П2.5 задаёт 0,10 и 0,125 м² при 0,28 м: табличная площадь больше измеренной на 25 %. Измеренная проекция вместе с измеренными скоростями курсантов образует откалиброванную конфигурацию приложения Г9 (раздел 2.6).

2.2.5 ВЫВОД

Библиотека профилей воспроизводит таблицы приложения № 2 методики: скорости свободного движения и площади проекций совпадают с табличными в допуске верификации, а воспроизведение заданных распределений скорости и времени начала эвакуации подтверждено тестами ISO 1 и 5. Подтверждение относится к самой библиотеке, а не к выбору профиля расчётчиком: от этого выбора отклонение от экспериментальных данных зависит сильнее (приложения Г11 и Г12).

2.3 Движение в помещениях и коридорах

2.3.1 ЯВЛЕНИЕ

Одиночный человек идёт со своей скоростью свободного движения. С ростом плотности людского потока она падает: люди мешают друг другу, шаг укорачивается. Примерно при 0,5 м²/м² (5 чел/м²) движение

переходит в скопление, где скорость задаёт поток, а не сам идущий. Кривая «скорость–плотность» – центральная зависимость методики: формула (П2.1) с коэффициентами по группам мобильности и видам пути [1, табл. П2.6, П2.7]. Произведение плотности на скорость даёт интенсивность движения q = D·V (П2.2), через которую определяется пропускная способность участков. Проверяется, что скорость одиночного агента равна скорости свободного движения и что в потоке она снижается по кривой (П2.1). Проверяется также, что поток через сечение коридора отвечает q = D·V, а расчётное время прохода помещений и коридоров согласуется с натурными экспериментами.

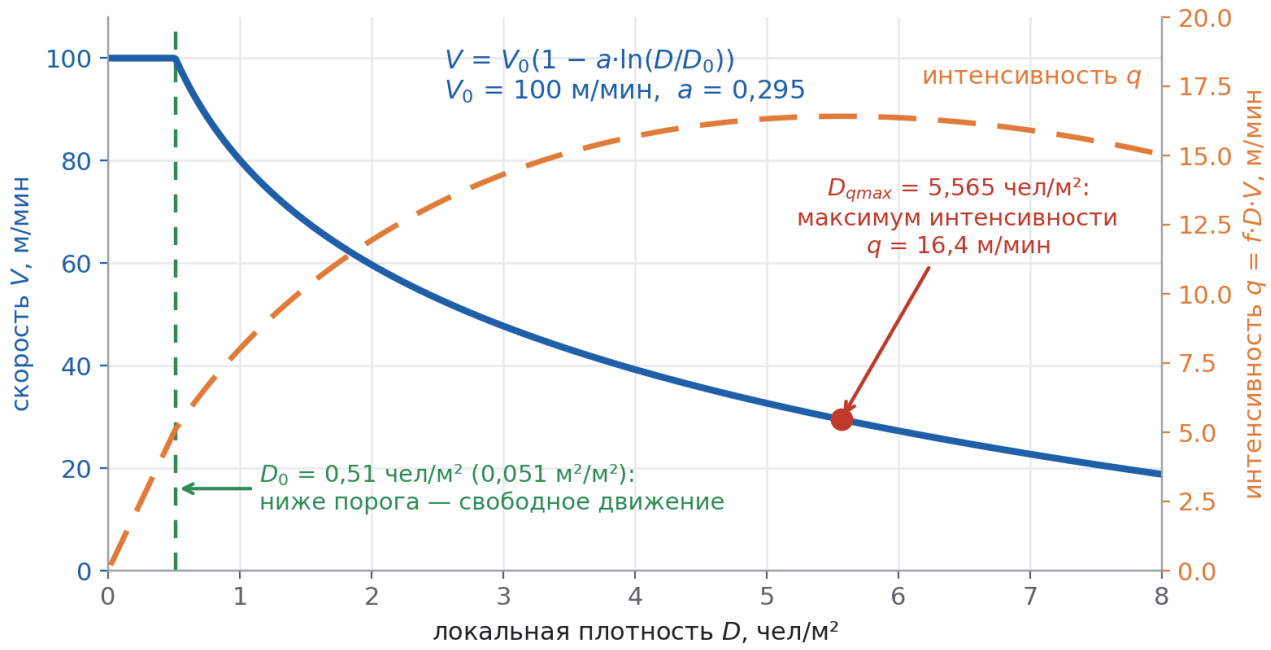
2.3.2 РЕАЛИЗАЦИЯ В МОДЕЛИ

Десять раз в секунду ядро вычисляет для каждого агента предельную скорость в точке, где он находится. Она и ограничивает длину его шага. Вычисление идёт в три приёма, и порядок их существен: множитель участка действует до учёта плотности, а предельная скорость – после неё.

Таблица 9. Вычисление предельной скорости агента в точке

Приём	Формула	Что учитывается
1	$v_1 = v_{пути} \cdot m_{участка}$	скорость свободного движения профиля на данном виде пути с множителем участка
2	$v_2 = v_1 \cdot \varphi(D_{лок})$	доля скорости по кривой «скорость–плотность» профиля от локальной плотности
3	$v = \min(v_2; v_{пред}) + v_{поверхн}$	отсечение по предельной скорости участка и добавка скорости движущейся поверхности

Кривая «скорость–плотность» задана профилем отдельно для горизонтального пути, лестниц и пандусов вниз и вверх (раздел 2.7). В профилях библиотеки методики она записана табулированной формулой (П2.1) с коэффициентами табл. П2.6 и П2.7: узлы «плотность – доля скорости свободного движения», между которыми ядро ведёт линейную интерполяцию. При плотности ниже порога D_0 доля равна единице, и агент идёт со скоростью свободного движения. Аргумент кривой – плотность в чел/м². Переход к плотности методики в м²/м² выполняется умножением на площадь проекции f.



Табуляция формулы (П2.1), коэффициенты табл. П2.6, профиль М0-3, горизонтальный путь.
Максимум интенсивности 16,4 м/мин получен по формуле (П2.1); табл. П2.8 даёт округлённое 16,5 м/мин.

Рисунок 5. Кривая «скорость–плотность» формулы (П2.1) для профиля М0-3: порог свободного движения D_0 и точка максимума интенсивности

Локальная плотность (величина, от которой берётся доля скорости) вычисляется не по площади участка, а по ближайшим соседям. Ядро просматривает агентов, видимых впереди по направлению шага, и для каждого берёт обратную величину площади личного пространства, заданной эллиптическими зонами «вдоль движения – поперёк» (0,279; 0,465; 0,929; 1,858 м²/чел) с линейной интерполяцией. Локальной плотностью служит наибольшее из полученных значений, ограниченное сверху 10 чел/м². Агенты позади по движению, уже пропустившие этого агента и невидимые из-за стены или перекрытия, в эту меру не входят. Ограничение проявляется в протяжённых коридорах: мера насыщается, когда проекции соседей приходят в касание, и дальнейшее уплотнение потока скорость агента уже не снижает.

Створ – отрезок ребра расчётной сетки, через который ядро считает число прошедших людей и удельный поток. Плотность и скорость в заданной области снимаются методом Вороного [33], как при обработке траекторий натурных опытов, поэтому расчётные и экспериментальные ряды сопоставимы.

Границы расчётных участков внутри одного коридора и перекрёстки коридоров объектами «дверь» не оформляются. Предел потока проёма относится к проёмам в стенах и к выходу из расчётной области, а не к сечениям сплошного пути (раздел 2.6). Результат расчёта без ограничения потока проёма зависит от просвета между проекциями агентов, который задан профилем и расчётчиком не изменяется.

2.3.3 ВЕРИФИКАЦИЯ

Сравниваются скорость одиночного агента, положение порога свободного движения D_0, форма кривой (П2.1) в расчёте и связь потока, плотности и скорости. Эталоны – аналитические решения тестов 2 и 13 стандарта ISO 20414 [5], таблицы П2.6–П2.8 методики и аналитическое решение задач пособия Академии ГПС [10]. Допуск документа при верификации ±10 %.

Таблица 10. Проверка движения на горизонтальном участке: постановки, требование эталона и результат при базовой конфигурации расчёта

Проверка	**Постановка**	**Требование эталона и допуск**	**Результат при базовой конфигурации**
Тест 2 ISO 20414 [5] (= IMO 1, NIST Verif. 2.1), приложение Г1. Скорость свободного движения в коридоре	один агент, коридор 2 м, путь 40,0 м, скорость 1,0 м/с	аналитическое решение 40,00 с; числового допуска стандарт ISO 20414 не назначает	40,73 с – отклонение +0,73 с (+1,8 %), в допуске; добавка отвечает разгону за 1,5 с, при ориентациях расчётной сетки 0° и 45° время совпадает
Тест 13 ISO 20414 (= IMO 12), приложения Г1 и Г2. Связь потока, плотности и скорости	коридор 30 × 4 м, 60…480 человек, выход во всю ширину без ограничения потока	заданная кривая «скорость–плотность» профиля и равенство $q = D \cdot V$	по пяти плотностям 0,47…3,89 чел/м² отклонение −7,0…+2,0 % по скорости и −8,5…+2,9 % по потоку, все точки в допуске; наибольшее отклонение при 0,5 чел/м² отвечает вкладу разгона
Приложение Г2. Порог свободного движения, табулирование кривой и её исполнение в расчёте	760 узлов кривых 27 профилей по трём видам пути и пять постановок с равномерным заполнением участка	D_0 = 0,51 чел/м² и формула (П2.1) с коэффициентами табл. П2.6 и П2.7	при $D \leqslant 0{,}50$ чел/м² скорость равна скорости свободного движения (узел кривой расположен на 0,50 вместо 0,51 чел/м², отклонение в промежутке не более 0,1 %); медиана отклонения табуляции 0,64 %, наибольшее 5,85 %; в расчёте по мере локальной плотности ядра до 7 чел/м² отклонение −0,9…0,0 %, а в шкале плотности по площади участка согласование сохраняется до ≈4,3 чел/м², кроме правильной гексагональной расстановки (+8…+24 %)
Приложение Г2. Предельная интенсивность горизонтального пути	коридоры шириной 0,7…3,0 м	q_{max} = 16,5 м/мин, что при f = 0,1 м² отвечает 2,75 чел/(с·м) [1, табл. П2.8]	предел по виду пути ядром не накладывается: удельный поток ограничен самой моделью движения и составляет 1,20…1,40 чел/(с·м) – ниже требования табл. П2.8

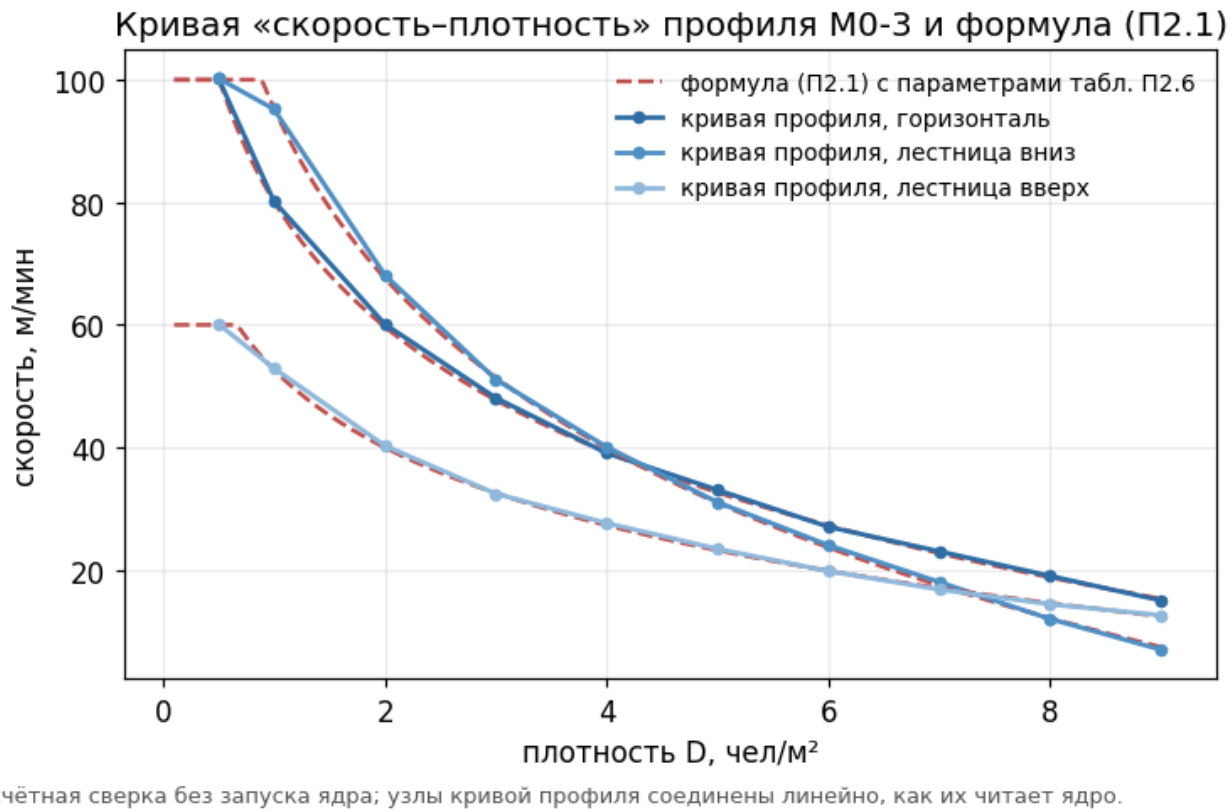


Рисунок 6. Табулированная кривая «скорость–плотность» профиля M0-3, узлы которой соединены линейно, как их читает ядро, и непрерывная формула (П2.1) для трёх видов пути

Зависимость (П2.1) исполняется там, где группа агентов движется как целое: отклонение от неё не превышает 0,9 % по мере плотности ядра. Расхождение с методикой состоит в другом: предел интенсивности горизонтального пути по табл. П2.8 ядро не накладывает. На результат это не влияет, поскольку расчётный удельный поток и без предела ниже требуемого. Положение максимума диаграммы «интенсивность–плотность» по (П2.2)–(П2.4) не проверялось.

Задачи пособия 1-2…9-2 поставлены на участке 20 × 2 м с открытым торцом шириной 2,0 м при N = 40…360 человек (приложение Г3). Эталон – аналитическое решение по формулам источника [10], а не по его печатным таблицам. Базовая конфигурация – профиль M0-3 и предел потока проёма 1,42 чел/(с·м). В откалиброванной включён режим УАМ, где эта величина вычисляется по приложению № 6 методики, как и в самом решении пособия (раздел 2.6).

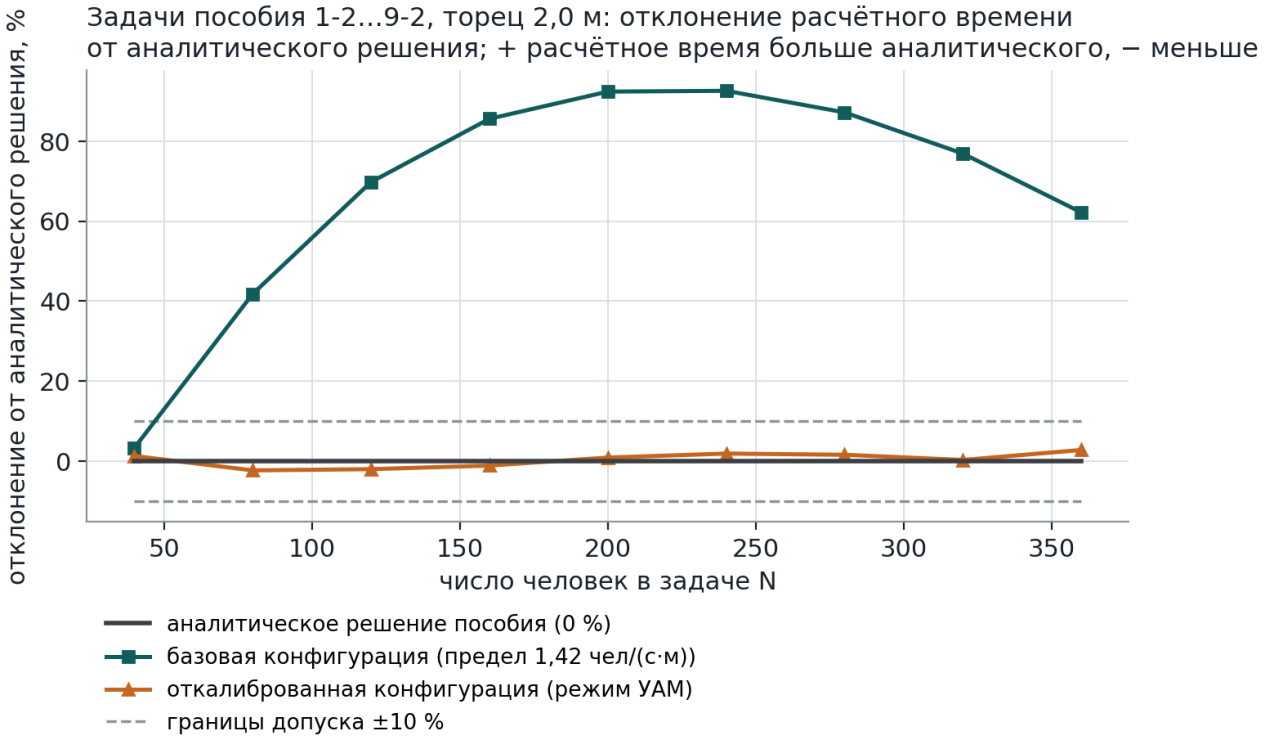


Рисунок 7. Задачи пособия 1-2…9-2, открытый торец 2,0 м: отклонение расчётного времени эвакуации от аналитического решения по числу человек N = 40…360. Базовая конфигурация расчёта с профилем М0-3 и пределом потока проёма 1,42 чел/(с·м), откалиброванная с режимом УАМ, полоса допуска

При базовой конфигурации расчётное время эвакуации больше аналитического решения на +0,5…+49,1 с: в допуске ±10 % одна задача из девяти (1-2, +3,3 %), в остальных восьми отклонение составляет +41,8…+92,6 %. Расчёт в этих задачах даёт оценку сверху. Причина в том, что сечению горизонтального пути шириной 2,0 м назначен предел потока проёма 1,42 чел/(с·м). Он лежит ниже интенсивности этого вида при скоплении, 2,25 чел/(с·м) при f = 0,1 м². При откалиброванной конфигурации отклонение составляет −0,5…+2,2 с (−2,3…+2,8 %), и в допуске девять задач из девяти. Числа по каждой задаче даны в приложении Г3, причина разобрана в разделе 2.6.

2.3.4 ВАЛИДАЦИЯ

Сравнение с экспериментом ведётся по двум опытам. Лабораторный коридор Forschungszentrum Jülich дал 28 постановок с разными ширинами входа, коридора и выхода. В опыте Академии ГПС на коридоре 20 × 2 м узкого места нет. Допуск документа при валидации ±20 %.

Коридор Jülich 2009

Источник данных	лабораторный опыт группы Forschungszentrum Jülich, Дюссельдорф, май 2009: 28 постановок «вход → коридор 8 м → выход» по 61…351 участнику, траектории 16 кадр/с [30;35]
Критерий оценки	валидация: измеренная величина – время прохода последнего участника через створ выхода, 51,4…160,4 с; допуск ±20 % по каждой постановке; для сведения приводятся меры ISO 20414 при порогах ERD ⩽ 0,45; EPC 0,6…1,4; SC ⩾ 0,6 [43]
Расчётная модель	геометрия по метаданным архива опыта; время начала эвакуации 0, равномерно-случайная расстановка в зоне ожидания при 2,5 чел/м², пять расстановок на постановку
Конфигурации расчёта	базовая: профиль M0-3, летняя одежда (взрослые, класс здания по [1, табл. П2.3]), предел потока проёма 1,42 чел/(с·м) [1, табл. П2.8] · откалиброванная: профиль составлен из измеренных в этом опыте скорости свободного движения V_0 = 1,55 м/с и кривой «скорость–плотность» при табличной площади проекции 0,10 м²; ограничение потока проёма снято, поскольку ёмкость створов измерена в этом же опыте и составляет 1,75…2,53 чел/(с·м), что выше 1,42

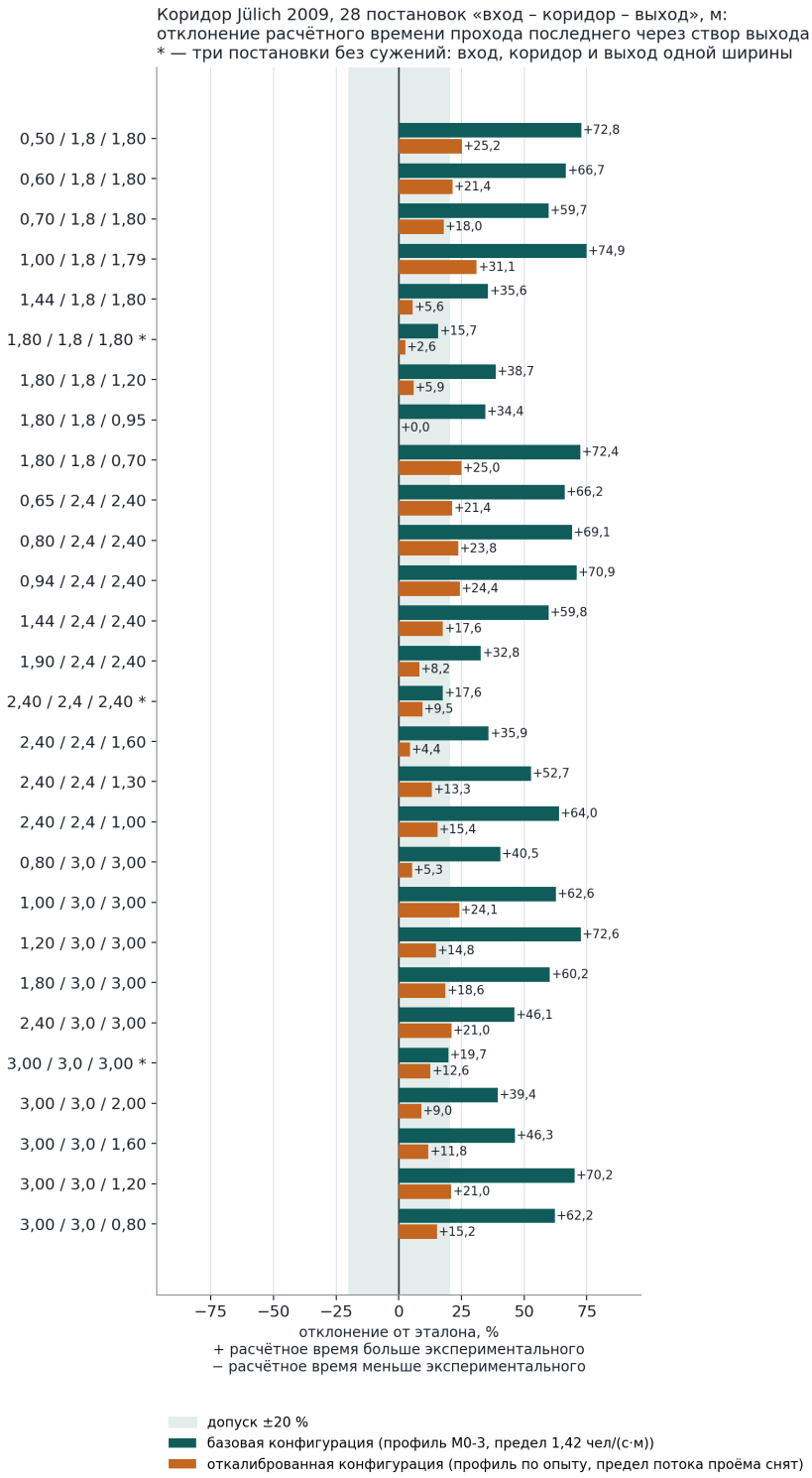


Рисунок 8. Опыт Jülich 2009, 28 постановок «вход – коридор – выход»: отклонение расчётного времени прохода последнего через створ выхода от экспериментального. Базовая конфигурация расчёта с профилем M0-3 и пределом потока проёма 1,42 чел/(с·м), откалиброванная с профилем по измеренным V_0 и кривой «скорость–плотность» и без ограничения, полоса допуска ±20 %. Звёздочкой отмечены три постановки, у которых все три ширины одинаковы

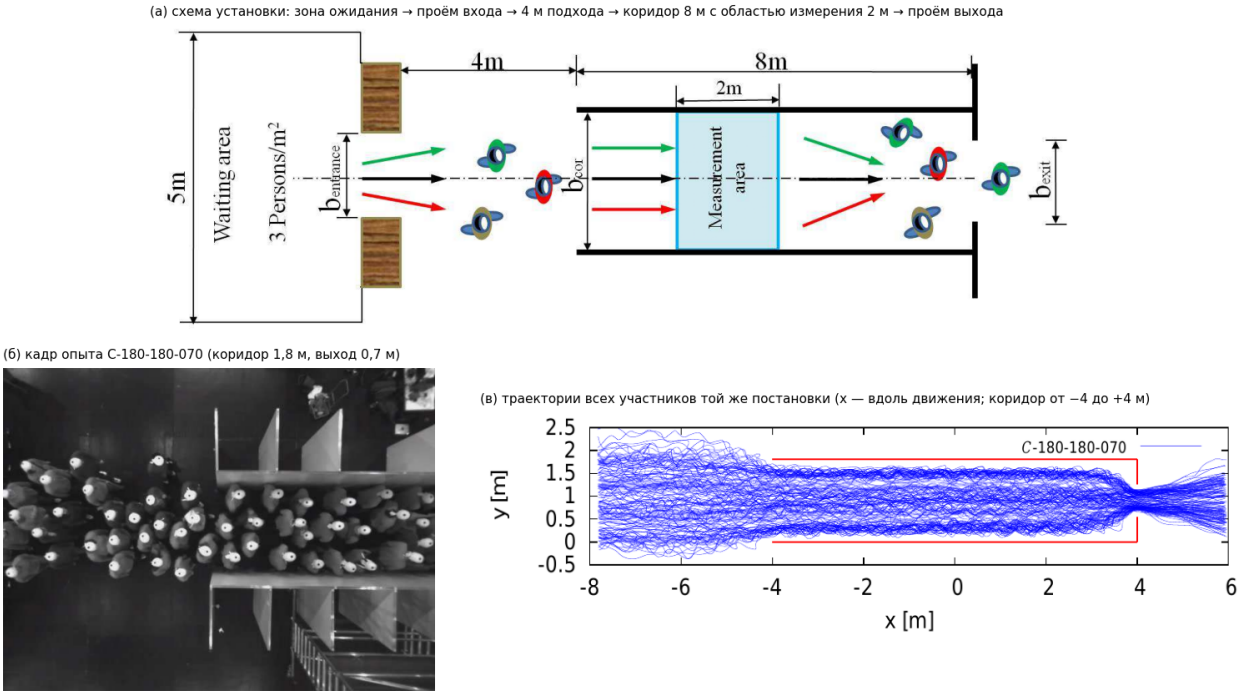


Рисунок 9. Опыт «коридор Jülich 2009»: (а) схема установки; (б) кадр постановки C-180-180-070; (в) траектории всех её участников, по [30], рис. 1 и 2

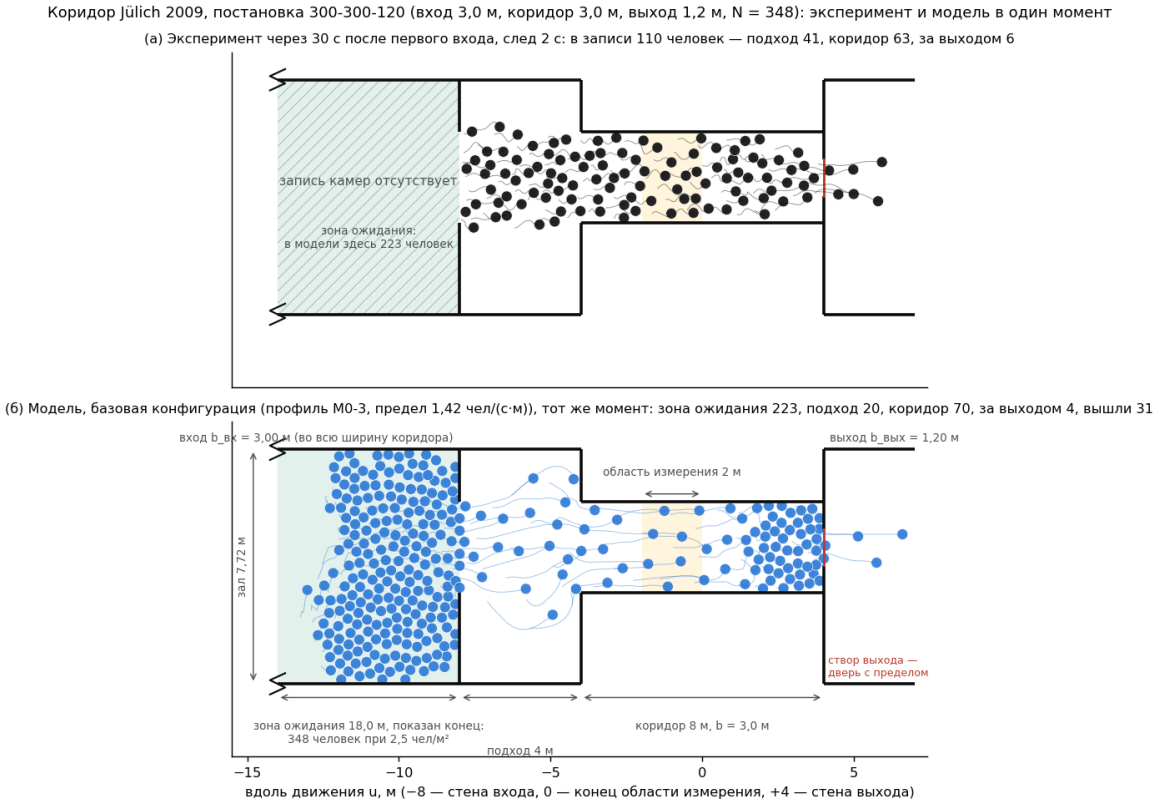


Рисунок 10. Коридор Jülich 2009, постановка 300-300-120 на 348 человек: (а) размещение участников через 30 с после первого входа; (б) план модели и положения агентов при базовой конфигурации расчёта с профилем M0-3

Время прохода задаёт узкое место постановки: вход в 15 случаях, выход в 10, сам коридор в 3. Отклонение по всему ряду характеризует пропускную способность створа, а не движение по коридору.

Таблица 11. Коридор Jülich 2009, 28 постановок: отклонение расчётного времени прохода последнего через створ выхода при двух конфигурациях расчёта

Показатель	**Базовая (профиль М0-3, предел потока проёма 1,42 чел/(с·м))**	**Откалиброванная (профиль по измеренным V_0 и кривой, без ограничения потока проёма)**
Отклонение времени, с	+12,8…+99,8 (в среднем +41,8)	0,0…+27,4 (в среднем +11,7)
Отклонение времени, %	+15,7…+74,9 (в среднем +52,1)	0,0…+30,9 (в среднем +15,2)
Постановок в допуске ±20 %	3 из 28	18 из 28
ERD · EPC · SC	0,51 · 0,67 · 0,96	0,19 · 0,84 · 0,95
Удельный поток створа выхода, отклонение	−35,6 %	−10,4 %

При базовой конфигурации расчётное время эвакуации больше экспериментального во всех 28 постановках – оценка сверху. В допуске ±20 % три постановки из 28. При откалиброванной конфигурации расчётное время тоже больше экспериментального во всех 28 постановках, но отклонение меньше: в десяти постановках с входом 0,5…1,2 м оно составляет в среднем +20,9 %, в остальных восемнадцати – +12,0 %, и в допуске 18 постановок из 28. Мера ERD отвечает порогу ISO 20414 только при откалиброванной конфигурации (0,19 при пороге 0,45). На узких входах 0,50…0,80 м расчётный удельный поток при ней составляет 1,86…1,95 чел/(с·м) при измеренных 2,04…2,43. Форма зависимости числа вышедших от времени совпадает с наблюдённой (SC 0,95…0,96): поток в расчёте столь же равномерен, отличается его величина. Числа по каждой постановке даны в приложении Г6.

В трёх постановках вход, коридор и выход одной ширины (1,8; 2,4 и 3,0 м): время здесь определяет движение по самому коридору. При базовой конфигурации отклонение составляет +12,8…+15,8 с, или +15,7…+19,7 %. При откалиброванной оно равно +2,3…+10,1 с, или +2,6…+12,5 %. В обоих случаях три постановки из трёх в допуске ±20 %, и это единственные точки ряда, попавшие в допуск при базовой конфигурации. Измеренный удельный поток этих коридоров 1,58…1,65 чел/(с·м) выше 1,42, поэтому при базовой конфигурации он ограничен пределом, а при откалиброванной – самой моделью. Различие между конфигурациями отражает движение между створами по измеренной кривой «скорость–плотность» при V_0 = 1,55 м/с против табличной кривой (П2.1) при 1,67 м/с у профиля М0-3.

Коридор 20 × 2 м Академии ГПС

Источник данных	видеозапись теста на точность моделей эвакуации, Академия ГПС МЧС России: коридор 20 × 2 м с выходом во всю ширину торца, три постановки по 20, 19 и 40 курсантов в форменной одежде [26]
Критерий оценки	валидация: измеренная величина – время выхода последнего из коридора, 14,3…20,1 с; допуск ±20 % по каждой постановке (собственный критерий источника ±25 %)
Расчётная модель	коридор 20 × 2 м, три случая начального размещения по видеозаписи, время начала эвакуации 0, десять расстановок на постановку
Конфигурации расчёта	базовая: профиль М0-3 по классу здания Ф4.2 [1, табл. П2.3], предел потока проёма 1,42 чел/(с·м) · откалиброванная: профиль курсанта по условиям этого опыта – проекция по антропометрии контингента (f = 0,08 м² вместо 0,10 м², проходной диаметр 0,24 м вместо 0,28 м), V_0 = 1,66 м/с и кривая «скорость–плотность» по скоростям, измеренным в этом коридоре, время разгона 1,1 с; ограничение потока проёма снято по измеренной в опыте ёмкости створа

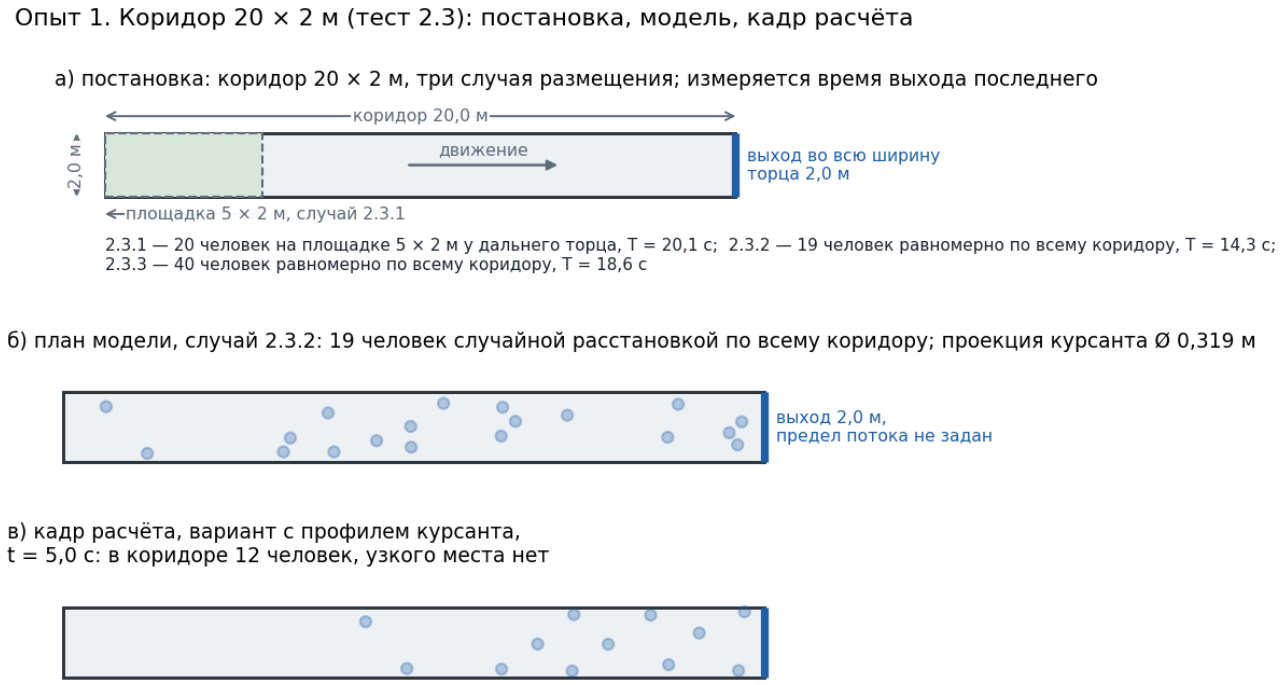


Рисунок 11. Опыт Академии ГПС, коридор 20 × 2 м: (а) постановка с размерами; (б) план модели постановки 2.3.2 на 19 человек с выходом во всю ширину торца; (в) кадр расчёта на 5-й секунде

Узкого места в постановке нет, и время здесь определяют скорость свободного движения и кривая «скорость–плотность»: изменение проекции и снятие предела потока проёма результата не меняют, поскольку створ поток не ограничивает (приложение Г9). Скорость свободного движения в обеих конфигурациях берётся измеренной в самой постановке, так что различие между ними создаёт одна кривая. Время выхода последнего отличается от экспериментального на −1,8…+4,5 с, а средний модуль отклонения составляет 13,4 % при базовой конфигурации и 10,1 % при откалиброванной. В допуске ±20 % две постановки из трёх при базовой конфигурации и три из трёх при откалиброванной, где отклонение равно −12,6…+15,5 %. Вне допуска при базовой конфигурации постановка 2.3.1 (+22,5 %, расчётное время эвакуации больше экспериментального): в ней люди размещены плотнее, чем в двух других, – 2 чел/м² на площадке у дальнего торца, а измеренная при этой плотности скорость на четверть выше той, что даёт табличная кривая. Эта постановка проверяет движение по коридору без узкого места. В опыте Jülich такому случаю отвечают три постановки из 28.

2.3.5 ВЫВОД

Свободное движение и связь «скорость–плотность» воспроизводятся в допуске верификации (тесты ISO 2 и 13, кривая (П2.1)), а там, где путь ограничен створом, расчётное время эвакуации при базовой конфигурации больше аналитического решения и эксперимента, то есть служит оценкой сверху. В коридоре без узкого места результат определяют скорость свободного движения и кривая, и откалиброванная конфигурация с кривой, измеренной в опыте, входит в допуск во всех постановках.

2.4 Взаимодействие людей и обход препятствий

2.4.1 ЯВЛЕНИЕ

В потоке люди расходятся, уступают дорогу, обгоняют идущих медленнее, огибают колонны и выступы стен, поворачивают за угол. При встрече двух потоков возникают конфликты, разрешение которых занимает время. Методика этих явлений отдельно не описывает: все они учтены в кривой «скорость–

плотность», а влияние поворотов пути предписано не учитывать [1, прил. № 5]. В индивидуально-поточной модели взаимодействие возникает из правил движения отдельных агентов, и от них зависит, образуется ли в расчёте скопление или застой и проходят ли агенты друг сквозь друга. Проверяется поведение агентов в тестах стандарта ISO 20414 на встречные потоки, обгон и движение за угол, а согласование с экспериментом – на узлах Jülich (поворот и Т-образное слияние), где измерена ёмкость узла.

2.4.2 РЕАЛИЗАЦИЯ В МОДЕЛИ

Отдельных правил «обход препятствия», «обгон» и «сопротивление встречному потоку» в ядре нет. Все перечисленные явления возникают из одного механизма: выбора направления очередного шага. Десять раз в секунду агент перебирает пробные направления и выбирает то, у которого наименьшая взвешенная сумма штрафов по правилам поведения. Пробные направления строятся вокруг курса к очередной промежуточной точке маршрута (±75° с шагом 15°, у многоугольных проекций ±60°) и дополняются отходом от ближайших соседей и вариантом «стоять». Веса штрафов заданы реализацией модели и расчётчиком не изменяются.

Таблица 12. Веса штрафов при выборе направления шага

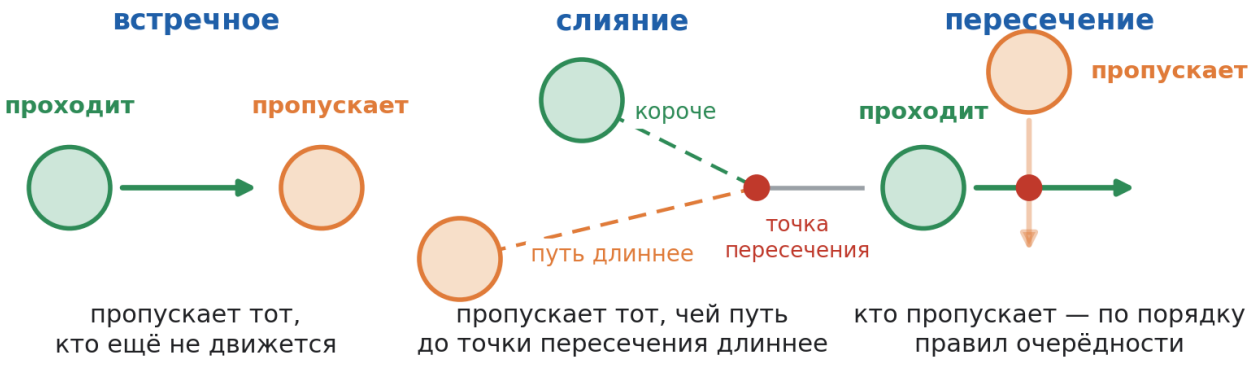
Правило поведения	Вес	Правило поведения	Вес
Цель	0,5	Отступ от стен	1,0
Стены	1,0	Полосы при встречном движении	1,0
Агенты	1,0	Обгон	0,5
Отход от соседей	2,0	Срезание угла	0,2
Препятствия	5,0		

Выбранный шаг обрезается первым касанием стены, створа непроходимой двери или проекции другого агента. Остаток шага выполняется скольжением вдоль этой границы. Агенты, невидимые по расчётной сетке, не участвуют ни в касаниях, ни в выборе направления, поэтому стена или перекрытие исключает соседа из взаимодействия. Непроходимое препятствие (колонна, выступ стены, оборудование) задаётся расчётчиком геометрией расчётной сетки: в занятом им месте треугольников нет, и агенты его огибают, получая штраф за приближение к его границе.

Двум агентам, которым для продолжения пути требуется пройти сквозь проекции друг друга, правило выбора направления разойтись не помогает: без дополнительного правила оба остаются на месте до конца расчёта. Применяются три уровня правил очерёдности.

Таблица 13. Три уровня правил очерёдности прохода

Уровень	Правило
Очерёдность в паре	уступающий определяется по уровню приоритета профиля, затем по признакам ситуации (узкое место, роль в группе сопровождения, ожидание), затем по виду взаимодействия потоков (попутное, встречное, слияние, пересечение), затем по случайной дробной части приоритета
Настойчивость	не продвигающийся агент уступает имеющему перед ним очерёдность; если уступать некому – получает право прохода, удерживает его 1,0 с, и соседи его пропускают
Разрыв замкнутых цепочек	не реже одного раза за половину времени удержания отыскиваются замкнутые цепочки взаимного ожидания, и одному из участников цепочки назначается право движения



порядок правил очерёдности:
уровень приоритета профиля → признаки ситуации (узкое место, роль в группе, ожидание) → вид взаимодействия потоков → розыгрыш дробной части приоритета → номер человека

Без правила очерёдности два человека, которым нужно пройти сквозь друг друга, остановились бы навсегда.

Рисунок 12. Очерёдность прохода в паре агентов: кто уступает при встречном движении, при слиянии и при пересечении потоков

Влияние этих правил на результат измерено на модели зрительного зала с трибунами. Без разрешения конфликтов время выхода последнего составляет 3448 с против 436 с при их разрешении. Одна неразрешённая помеха удлиняет окончание кривой прибытия до 1451 с против 478 с у остальных. Если ни один не завершивший эвакуацию агент не продвинулся за 10 с, ядро записывает список таких агентов и продолжает расчёт, поэтому застой обнаруживается расчётчиком, а не остаётся незамеченным.

Отдельного правила замедления на повороте у агента нет: направление меняется через модель разгона (ускорение вперёд $a = V_0$ за 1,5 с, торможение 2a, поперечное 1,5a), и скорость снижается как следствие этих ограничений. Методика влияние поворота также не учитывает [1, прил. № 5, п. 9].

2.4.3 ВЕРИФИКАЦИЯ

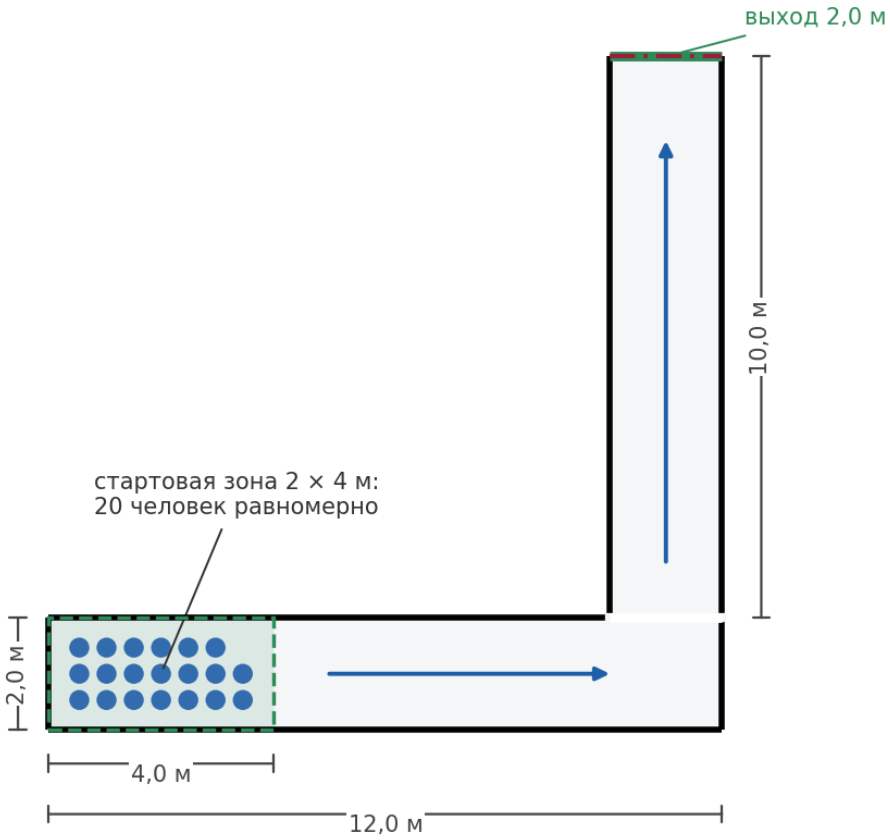
Протокол ISO 20414 содержит три постановки, проверяющие взаимодействие агентов [5]: движение за угол, встречные потоки и обгон человека с ограниченной подвижностью. Критерий каждой качественный: стандарт ISO 20414 указывает, какое соотношение величин должно выполняться, но числового допуска не назначает. Расчёты выполнены при базовой конфигурации. Параметры агента в этих тестах задаёт сам стандарт ISO 20414 (V_0 = 1,00 м/с, круг Ø 0,357 м).

Таблица 14. Тесты ISO 20414, проверяющие взаимодействие людей и обход препятствий

Тест	Постановка	Требование эталона	Результат при базовой конфигурации
ISO 4. Движение за угол	Г-образный коридор, плечи 12 × 2 и 2 × 10 м, выход 2,0 м, 20 человек	траектории не выходят за границы коридора	наименьшее расстояние от центра проекции до стены 0,1399 м при проходном радиусе 0,140 м; за границу не вышла ни одна из примерно 27 000 проверенных точек; поток до угла 1,86…2,10 чел/с, после угла 1,42…1,49 чел/с (−26 %)
ISO 6. Встречные потоки	комнаты 10 × 10 м, коридор 10 × 2 м, 100 человек, навстречу 0 / 10 / 50 / 100	время входа последнего растёт с числом встречных	60,0…118,2 с (+5,7…+96,9 %); рост монотонный, полосы размаха соседних шагов не пересекаются; во всех 20 расчётах вышли все
ISO 7. Обгон человека с ограниченной подвижностью	рампа 1,4 м уклоном 1:6 между комнатами 6 × 2 м, 24 человека, впереди агент с габаритом 0,75 м и скоростью 0,80 м/с	выход зоны 1 в сценарии 1 позже, чем в сценарии 2	34,0 с против 29,2 с (+16,4 %); полосы размаха не пересекаются ни в одной из пяти пар расчётов

ISO 20414, Test 4. Движение за угол — постановка источника

Г-образный коридор шириной 2,0 м (Annex B ISO): стартовая зона 2 × 4 м + прямой участок 2 × 8 м + участок 2 × 10 м под 90°.
20 человек, t_пред = 0, V = 1,0 м/с.
Проверяется: никто не выходит за стены на повороте; поток огибает угол.



Источник постановки: ISO 20414:2020 «Fire safety engineering — Verification and validation protocol for building fire evacuation models», раздел 5, Test 4 (Movement around a corner); геометрия — по Annex B и конспекту верификация/конспекты/02-iso-20414.md.

Рисунок 13. Тест 4 ISO 20414 «Движение за угол»: схема постановки источника (Г-образный коридор шириной 2,0 м, стартовая зона 2 × 4 м, 20 человек со скоростью 1,0 м/с)

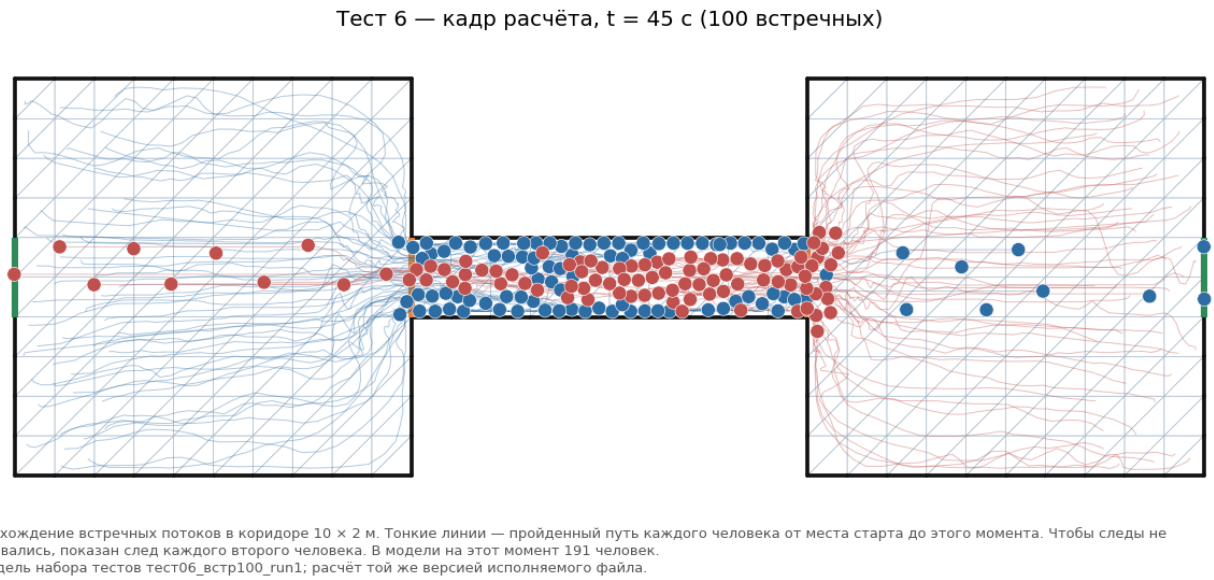


Рисунок 14. Тест 6 ISO 20414 «Встречные потоки»: кадр расчёта при базовой конфигурации на 45-й секунде, 100 встречных. Два потока расходятся по полосам в коридоре 10 × 2 м

Все три требования выполнены, и взаимной блокировки агентов не возникло ни в одном из расчётов. Положение переключателя режима УАМ на эти постановки не влияет, и откалиброванной конфигурации они не требуют. Числа получены при параметрах агента, заданных стандартом ISO 20414, и на расчёт пожарного риска не переносятся (приложение Г1).

Отдельного теста на обход препятствия ни ISO 20414, ни циркуляр IMO MSC.1/Circ.1533 [6], ни записка NIST TN 1822 [41] не содержат. Препятствием служит внутренний угол коридора в тесте ISO 4. Снижение потока за углом отдельным параметром не задано и получается из правил движения: пути сходятся к углу, образуя область повышенной плотности. Встречное движение проверено также тестом IMO 8 на двух моделях, переданных заказчиком. Числового эталона у него нет (приложение Д).

2.4.4 ВАЛИДАЦИЯ

Экспериментальный ряд по этому разделу один – узлы опытов Forschungszentrum Jülich (приложение Г8), где измерена ёмкость узла: наибольший установившийся удельный поток через него. Из четырёх типов узла к настоящему разделу относится поворот коридора на 90°, где поток меняет направление. Т-образный узел, где сходятся два потока, рассматривается в разделе 2.5, короткий проём и длинное сужение – в разделе 2.6. Меры согласия по всему ряду из семи узлов приведены здесь, поскольку ряд оценивается целиком. Допуск документа при валидации ±20 %.

Источник данных	опыты Forschungszentrum Jülich 2006 и 2009 гг.: поворот коридора на 90° при ширине 2,40 и 3,00 м [31;30;35]
Критерий оценки	валидация: измеренная величина – ёмкость узла, 1,45 чел/(с·м) на повороте; значение подтверждено вычислением по опубликованным траекториям архива (1,43 при b = 2,40 м и 1,38 при b = 3,00 м); допуск ±20 % по каждой точке, по ряду из семи узлов – меры ERD ⩽ 0,45 и EPC 0,6…1,4 [43]
Расчётная модель	подводящие коридоры, узел и зал за ним собраны одним помещением, объекты «дверь» внутри не задаются; плотность расстановки 3,5 чел/м², время начала эвакуации 0, 300 и 375 человек на повороте, пять расстановок на точку
Конфигурации расчёта	базовая: профиль M0-3, летняя одежда (взрослые, класс здания Ф4.3 по [1, табл. П2.3]), предел потока проёма 1,42 чел/(с·м), который в сечении узла без объекта «дверь» не применяется · откалиброванная: профиль составлен из измеренных в коридорном опыте Jülich 2009 скорости свободного движения V_0 = 1,55 м/с и кривой «скорость–плотность» при табличной площади проекции 0,10 м²; предел потока проёма не изменён, поскольку в узле он и без того не действует

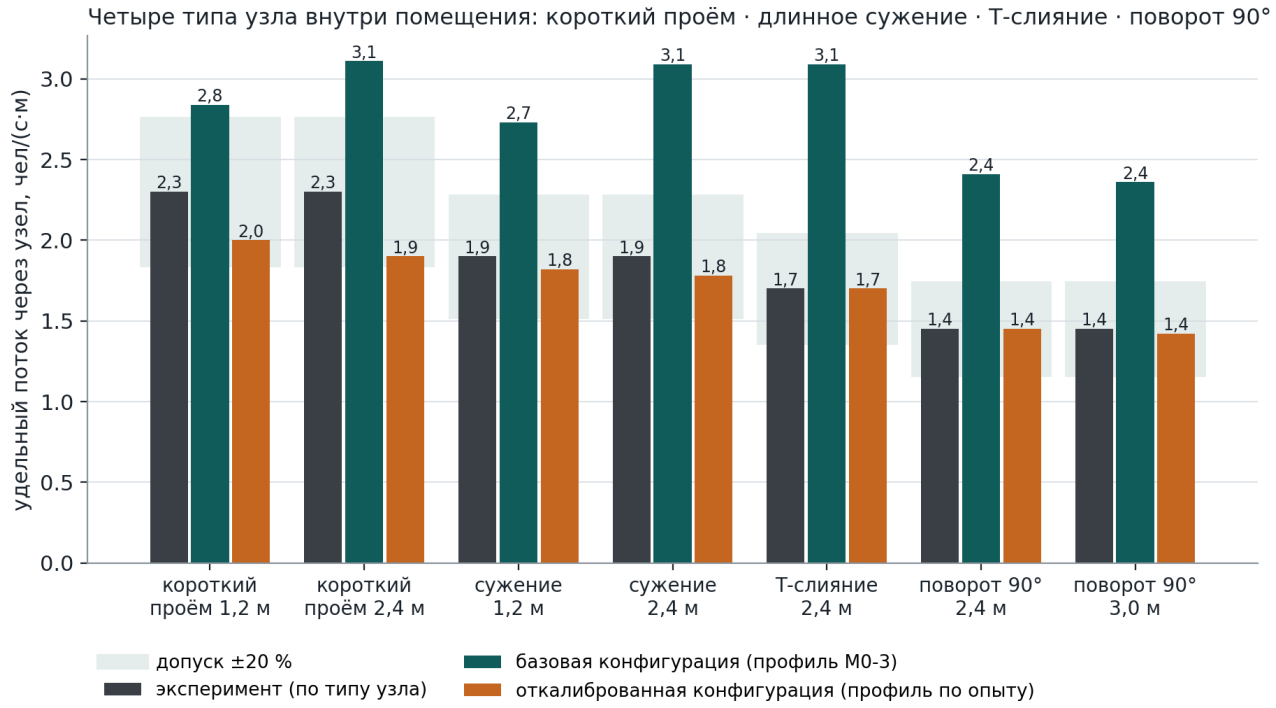
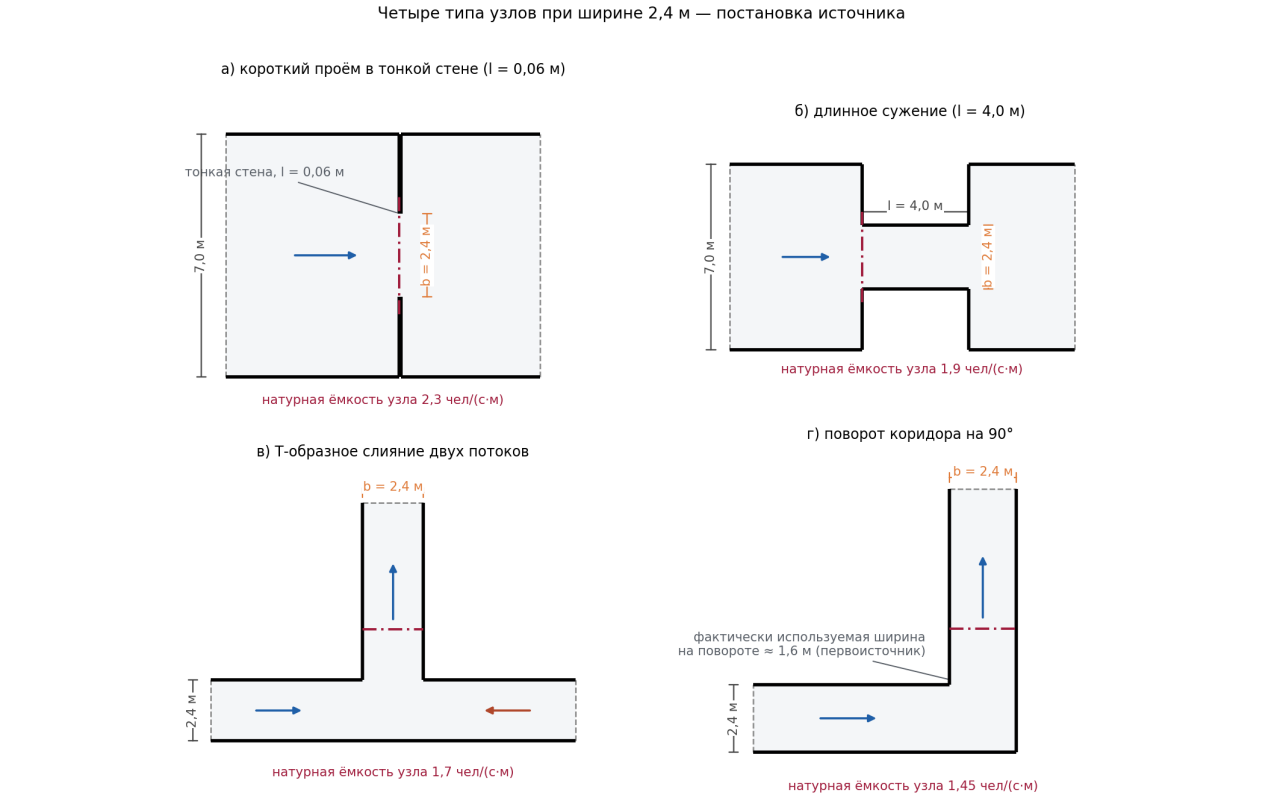


Рисунок 15. Ёмкость узлов опытов Jülich по семи точкам: удельный поток через узел, чел/(с·м), при двух конфигурациях расчёта против измеренной в опыте. Базовая с профилем M0-3, откалиброванная с профилем по измеренным V_0 и кривой «скорость–плотность», полоса допуска ±20 %



Ёмкость узла измерена в опытах Jülich по потоку на установившейся фазе: 2,30 / 1,90 / 1,70 / 1,45 чел/(с·м) — короткий проём, длинное сужение, Т-образное слияние, поворот. Разброс ёмкости по типам узлов — в 1,59 раза, хотя ширина одна и та же: единой зависимости «плотность — поток» для узлов разной геометрии нет. Красный штрихпунктир — створ замера.

Источник постановки: J. Zhang, A. Seyfried. Quantification of bottleneck effects for different types of facilities // Transportation Research Procedia 2 (2014) 51–59, препринт arXiv:1508.06789, § 2 (геометрия) и рис. 10 с § 3.2 (ёмкости); ширины коридоров Т-образного узла — J. Zhang и др., JSTAT (2011) P06004, табл. 3.

Рисунок 16. Четыре типа узлов опытов Jülich при ширине 2,4 м: короткий проём, длинное сужение, Т-образное слияние и поворот коридора на 90°. Штрихпунктиром показан створ замера, под каждой схемой – измеренная в опыте ёмкость узла

Таблица 15. Поворот коридора на 90°: удельный поток через узел и время выхода последнего при двух конфигурациях расчёта; ряд из семи узлов приложения Г8 целиком

Показатель	**Базовая (профиль M0-3)**	**Откалиброванная (профиль по измеренным V_0 и кривой)**
Поворот 90°, b = 2,40 м: поток, чел/(с·м), при измеренных 1,45	2,41 (+66,4 %)	1,45 (−0,2 %)
Поворот 90°, b = 3,00 м: поток, чел/(с·м), при измеренных 1,45	2,36 (+62,9 %)	1,42 (−2,3 %)
Две постановки раздела (поворот 2,40 и 3,00 м): в допуске ±20 % по потоку	0 из 2	2 из 2
Все семь узлов приложения Г8 (с коротким проёмом и длинным сужением): в допуске ±20 % по потоку	0 из 7	7 из 7
Все семь узлов приложения Г8: меры согласия ERD и EPC (пороги ⩽ 0,45 и 0,6…1,4)	0,520 и 0,663	0,105 и 0,917
Расчётное время выхода последнего на повороте 2,40 и 3,00 м, с	70,0 и 71,4	104,6 и 107,0

При базовой конфигурации расчётный удельный поток через узел больше измеренного, а значит, расчётное время прохода узла меньше экспериментального – оценка снизу. Ни одна из двух точек настоящего раздела в допуск ±20 % не попадает, и по всему ряду узлов в него не входит ни одна точка из семи. При откалиброванной конфигурации, где заменён только профиль, отклонение по двум точкам раздела равно −2,3…−0,2 %, и обе входят в допуск. По ряду из семи узлов в допуске 7 точек из 7 при ERD

0,105 и EPC 0,917, отвечающих порогам ISO 20414. В пересчёте на эквивалент времени прохода те же семь точек дают 1 из 7 в допуске при базовой конфигурации и 6 из 7 при откалиброванной.

Отклонение объясняется тем, что ёмкость узла в модели определяют кривая «скорость–плотность» и площадь проекции профиля. Предел потока проёма в сечении без объекта «дверь» не действует (раздел 2.6), других ограничений в узле нет. Площадь проекции в обеих конфигурациях одна и та же, поэтому результат задаёт кривая, а кривые расходятся сильнее скоростей. При плотности 2 чел/м² измеренная скорость ниже, чем по кривой (П2.1) профиля M0-3, на 27 %, при 3 чел/м² – на 37 %. Сами скорости свободного движения различаются на 7,2 %.

Таблица 16. Скорость по табличной кривой профиля базовой конфигурации и по измеренной в коридоре Jülich кривой откалиброванной конфигурации, м/с

Плотность, чел/м²	Профиль M0-3 (базовая конфигурация)	Кривая, измеренная в коридоре Jülich (откалиброванная конфигурация)
2	1,00	0,73
3	0,79	0,50

2.4.5 ВЫВОД

Качественные требования тестов ISO 4, 6 и 7 выполнены без взаимной блокировки агентов, а числом подтверждено изменение направления потока в узле: при базовой конфигурации расчётный поток на поворотах больше измеренного, и расчётное время прохода узла служит оценкой снизу. При откалиброванной конфигурации, где профиль составлен из измеренных в опыте скорости свободного движения и кривой «скорость–плотность», обе точки раздела входят в допуск, а весь ряд из семи узлов укладывается в допуск и в пороги мер ERD и EPC.

2.5 Слияние потоков

2.5.1 ЯВЛЕНИЕ

Два людских потока сходятся на общем участке пути: из двух коридоров в один, из помещений в коридор, с этажей в лестничную клетку. Их интенсивности складываются, и если сумма превышает пропускную способность общего участка, перед ним образуется скопление. Упрощённая аналитическая модель методики [1, прил. № 6] описывает это так: интенсивность объединённого потока получается сложением потоков сходящихся участков, отнесённым к ширине общего участка, скопление возникает, когда она превышает предельную интенсивность общего участка, а время существования скопления определяется его пропускной способностью при максимальной плотности. Скопление задерживает людей, и время его рассасывания составляет основную часть расчётного времени эвакуации на таких схемах. Проверяется, что при слиянии в расчёте образуется скопление, что время его рассасывания согласуется с аналитическим решением пособия, и что измеренная в эксперименте ёмкость Т-образного узла воспроизводится.

2.5.2 РЕАЛИЗАЦИЯ В МОДЕЛИ

Отдельной подмодели слияния в ядре нет: узел работает так же, как любой участок, а слияние складывается из движения отдельных агентов. Каждый агент выбирает направление шага к своей цели. При встрече с другим агентом порядок прохода определяет правило очерёдности, одним из признаков которого служит подход по сливающемуся направлению (раздел 2.4). Когда к общему участку подходят два потока, агенты заполняют его площадь и по мере уплотнения замедляются по кривой «скорость–плотность» своего профиля. Пропускную способность сечения задают две величины методики: площадь

горизонтальной проекции человека и кривая (П2.1). Отдельного правила сложения интенсивностей (П6.6) в расчёте нет, сумма потоков возникает из движения агентов.

Ограничение потока в модели связано с объектом «дверь». Дверь задаётся на проёме в стене и на выходе из расчётной области. На границах расчётных участков одного коридора, на перекрёстках и на входе в участок меньшей ширины без дверного полотна её нет. Участки стыкуются по рёбрам расчётной сетки (раздел 2.6). Правило (П6.13) ограничивает поток на границе участков интенсивностью q_{Dmax} следующего вида пути. В расчёте оно поэтому не действует: через стык проходит столько людей, сколько пропускает плотность на нём. Скопление перед общим участком образуется, но образует его плотность, а не назначенный границе предел.

У модели проёма два режима, и поведение узла при смене ширины участка зависит от того, какой из них включён. Когда предел потока проёма задан значением (это положение по умолчанию и базовой конфигурации расчёта), поток на сужении не переформировывается. В режиме УАМ предел створа вычисляется по ходу расчёта правилом (П6.4) упрощённой аналитической модели [1]. Интенсивность q равна $q_{гор}(D_ф)\cdot b_{ст}/b$, но не больше верхнего предела 19,6 м/мин табл. П2.8. Происхождение обоих значений разобрано в разделе 2.6.

Расчётчик может оформить границу расчётных участков объектом «дверь» намеренно. Предел такого створа задаётся тогда по виду следующего участка: для горизонтального пути q_{Dmax} = 13,5 м/мин, или 2,25 чел/(с·м) при площади проекции 0,1 м². Такое значение в 1,59 раза больше предела дверного проёма 1,42 чел/(с·м) [1, табл. П2.8]. Так собрана откалиброванная конфигурация задач слияния. Приёмом построения расчётных моделей зданий она не служит.

2.5.3 ВЕРИФИКАЦИЯ

Аналитическое решение для слияния даёт пособие Академии ГПС: пятнадцать задач 28-2…42-2 на Т-образном перекрёстке двух коридоров [10, § 2.4]. Формулы пособия дословно повторяют упрощённую аналитическую модель приложения № 6 методики. Сравнение поэтому показывает, воспроизводит ли модель движения то же время на той же схеме.

Источник	пособие Академии ГПС МЧС России [10, § 2.4], задачи 28-2…42-2
Постановка	участки-источники по 10 × 2 м, узел слияния 2 × 2 м, общий путь 5 × 1,7 м с выходом в конце; две серии плотностей расстановки 0,1…0,9 м²/м², $N_1 + N_2$ = 80…360 человек
Критерий оценки	верификация: время выхода последнего человека по аналитическому решению пособия, 28,42…101,62 с; допуск ±10 %
Расчётная модель	время начала эвакуации ноль, три начальных числа расстановки на задачу, 90 расчётов
Конфигурации расчёта	базовая: профиль М0-3, летняя одежда [1, табл. П2.3]; границы расчётных участков – швы расчётной сетки без объектов дверей, на выходе из расчётной области дверь с пределом потока проёма 1,42 чел/(с·м) [1, табл. П2.8] · откалиброванная: объекты дверей на границах участков и на выходе, предел каждого створа по виду пути 2,25 чел/(с·м) – значение, заложенное в само аналитическое решение, где поток на границе участков при скоплении ограничен q_{Dmax} горизонтального пути 13,5 м/мин [1, табл. П2.8]

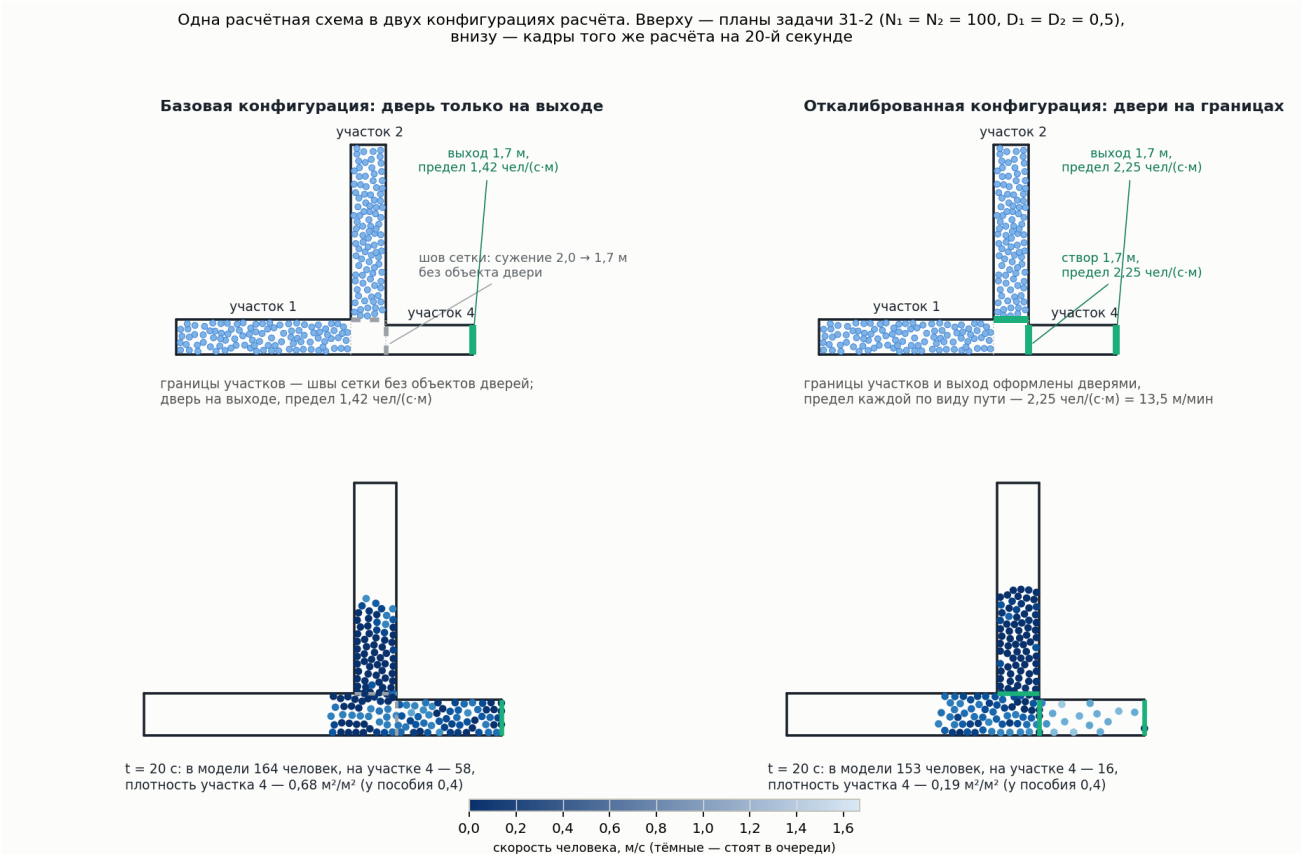


Рисунок 17. План модели задачи 31-2 и кадры расчёта при двух конфигурациях. Слева базовая: границы участков – швы расчётной сетки, дверь с пределом 1,42 чел/(с·м) только в створе выхода. Справа откалиброванная: двери на каждой границе и на выходе, предел 2,25 чел/(с·м)

Таблица 17. Задачи слияния 28-2…42-2 при двух конфигурациях расчёта

Конфигурация расчёта	Отклонение Δ	Средний модуль Δ	В допуске ±10 %	Удельный поток на сужении 2,0 → 1,7 м, чел/(с·м)
аналитическое решение пособия	–	–	–	2,25
базовая (дверь с пределом 1,42 чел/(с·м) на выходе)	+33,4…+51,2 %	45,0 %	0 из 15	2,175 (1,635…3,218)
откалиброванная (двери на границах участков, предел 2,25 чел/(с·м))	+3,9…+10,9 %	6,6 %	14 из 15	2,079 (1,944…2,180)

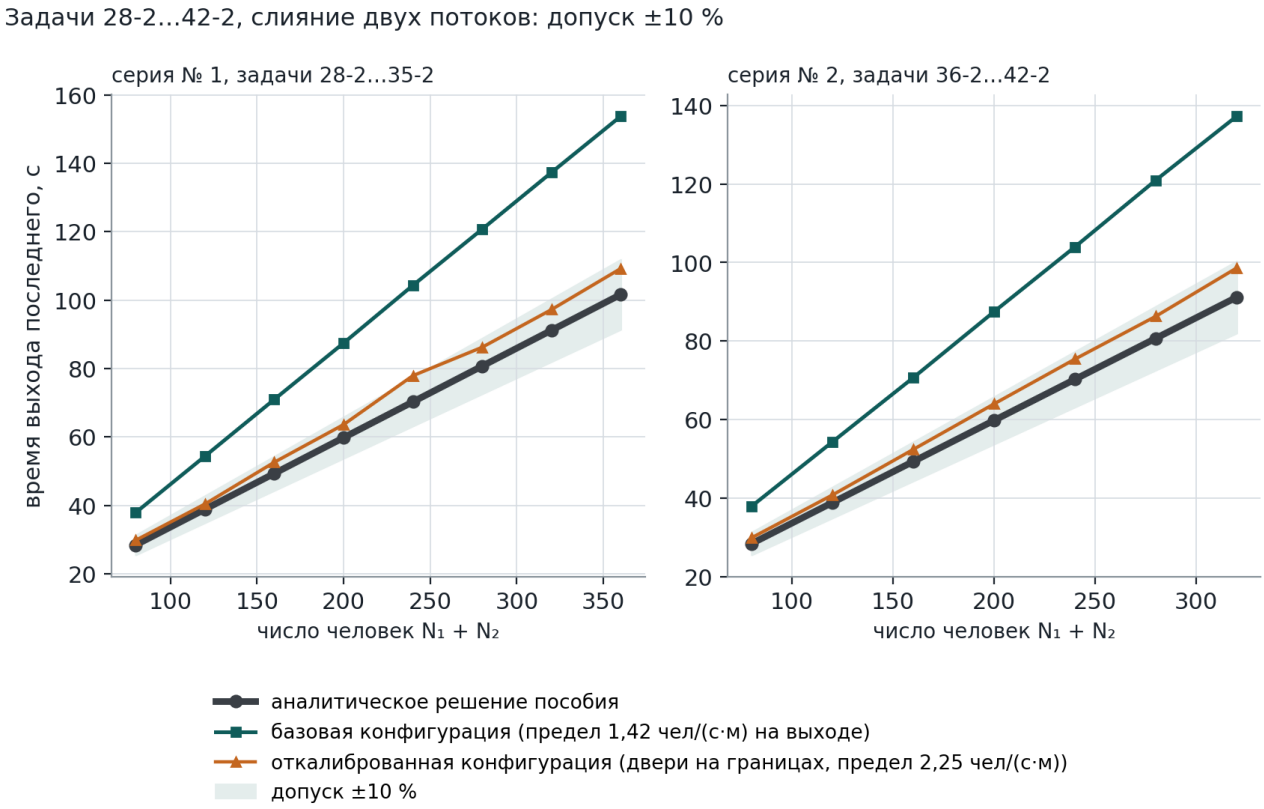


Рисунок 18. Задачи 28-2…42-2, время выхода последнего человека по двум сериям: аналитическое решение пособия с полосой допуска ±10 %, базовая конфигурация расчёта и откалиброванная. В базовой дверь с пределом 1,42 чел/(с·м) стоит на выходе. В откалиброванной двери на границах участков имеют предел 2,25 чел/(с·м)

При базовой конфигурации расчётное время эвакуации больше аналитического решения во всех пятнадцати задачах – это оценка сверху расчётного времени эвакуации. Узким местом становится дверь на выходе из расчётной области: через неё проходит 1,42 чел/(с·м). Аналитическая схема пропускает через то же сечение 2,25 чел/(с·м) и выход отдельно не ограничивает. Перед дверью на всём общем пути образуется очередь, которой в решении пособия нет. В задаче 31-2 плотность общего пути составляет 0,650 против 0,40 м²/м², а проход его последним человеком занимает 24,22 с вместо 7,50. На самом сужении 2,0 → 1,7 м, где объекта двери нет, расчётный поток равен 2,175 чел/(с·м), или 96,7 % от заложенных в решение 2,25. Расхождение создаёт нижележащий створ, а не сужение.

При откалиброванной конфигурации, где границы участков оформлены дверями с пределом по виду пути, аналитическое решение воспроизводится в допуске ±10 % в четырнадцати задачах из пятнадцати. Остаточное отклонение положительно и создаётся завершающей стадией выхода. Плотность общего пути составляет 0,213 вместо 0,40 м²/м², проход этого участка последним человеком – 4,3…4,4 с против 7,50. Подход головы потока к узлу слияния (1,7…1,8 с) в аналитической схеме отсутствует. Числа по каждой задаче приведены в приложении Г4.

Оговорка расчётчику: ограничение потока по виду пути на границах расчётных участков методика предусматривает правилом (П6.13), но в модели движения оно не возникает. Предел действует только на створе с объектом «дверь». Оформление границ участков дверями с пределом 2,25 чел/(с·м) отвечает условиям аналитической задачи и приёмом построения расчётных моделей зданий не служит.

2.5.4 ВАЛИДАЦИЯ

Экспериментальный ряд по слиянию в документе один: Т-образное слияние двух коридоров в опытах Forschungszentrum Jülich, где измерена ёмкость узла – наибольший удельный поток через сечение объединения в установившейся фазе движения.

Источник данных	Forschungszentrum Jülich, опыты 2009 г.: Т-образное слияние двух коридоров шириной 2,40 м в магистраль 2,40 м, 132…305 участников, сняты траектории каждого [30;31;35]
Критерий оценки	валидация: ёмкость узла 1,70 чел/(с·м), подтверждённая вычислением по траекториям архива (1,64 чел/(с·м)); допуск ±20 % [43]
Расчётная модель	подводящие коридоры, узел и зал за ним заданы одним помещением, объекты «дверь» внутри не задаются; 400 человек при плотности расстановки 3,5 чел/м², пять начальных чисел расстановки
Конфигурации расчёта	базовая: профиль М0-3, летняя одежда (взрослые, класс здания Ф4.3 [1, табл. П2.3]); предел потока проёма 1,42 чел/(с·м) в сечении узла без объекта «дверь» не действует · откалиброванная: профиль составлен из измеренных в коридорном опыте Jülich 2009 скорости свободного движения V_0 = 1,55 м/с и кривой «скорость–плотность» при табличной площади проекции 0,10 м²

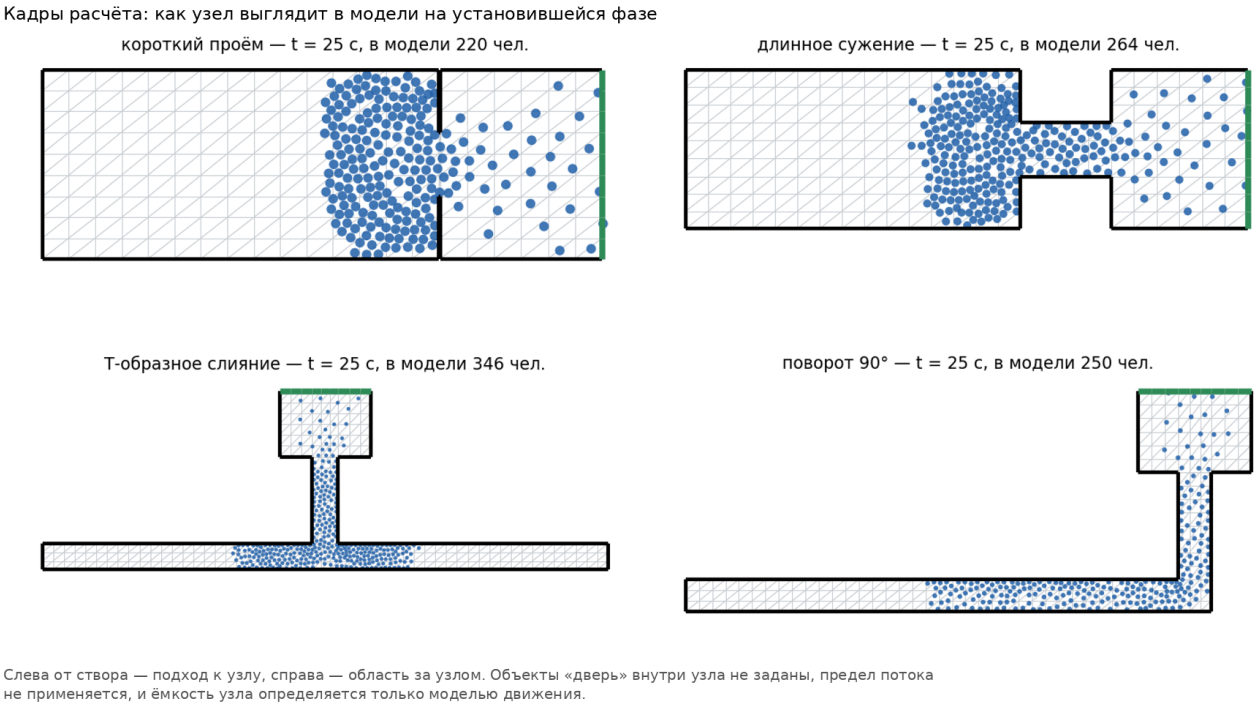


Рисунок 19. Кадры расчёта на установившейся фазе по четырём узлам опытов Jülich. Третий кадр – Т-образное слияние двух потоков в магистраль шириной 2,4 м

Таблица 18. Т-образное слияние 2,40 м, удельный поток через узел против измеренных 1,70 чел/(с·м)

Показатель	Базовая конфигурация (профиль M0-3)	Откалиброванная конфигурация (профиль по измеренным V_0 и кривой)
Удельный поток через узел, чел/(с·м)	3,09	1,70
Отклонение по потоку	+81,8 %, вне допуска ±20 %	−0,1 %, в допуске ±20 %
Время выхода, с	74,5	121,3
Отклонение в пересчёте на время	−38,6 %, вне допуска ±20 %	+0,1 %, в допуске ±20 %

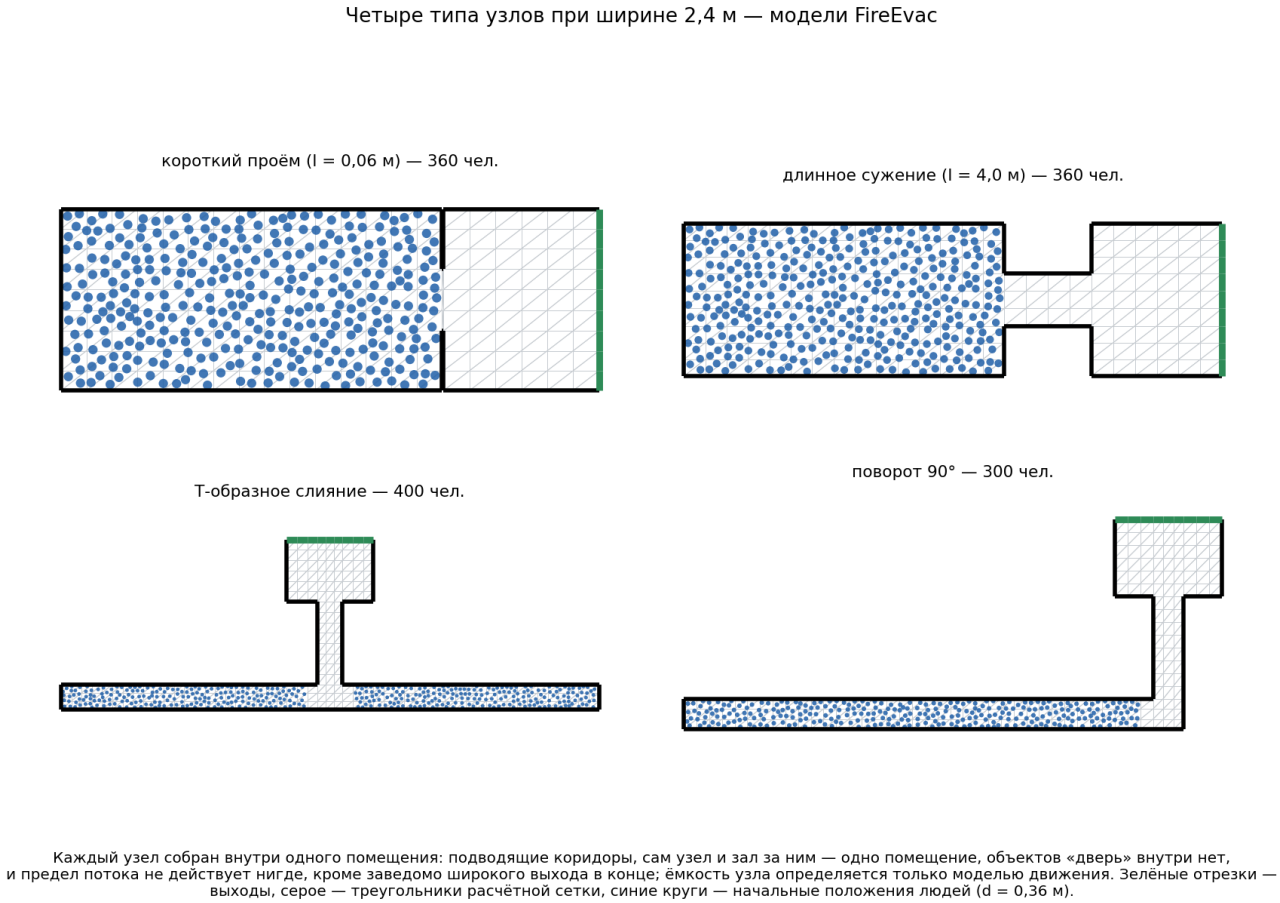


Рисунок 20. Планы моделей четырёх узлов опытов Jülich при ширине 2,4 м. Слева внизу – Т-образное слияние двух потоков в магистраль 2,40 м: подводящие коридоры, узел и зал за ним заданы одним помещением. Объектов «дверь» внутри нет, и предел потока проёма в сечении узла не действует

При базовой конфигурации расчётный поток через узел больше измеренного, а расчётное время эвакуации – соответственно меньше экспериментального: расчёт даёт оценку снизу. При откалиброванной конфигурации расчётный поток совпадает с измеренным. Эталонное время для пересчёта, 121,3 с, получено приведением расчётного времени эвакуации к измеренной ёмкости узла ($T_э \approx T_р \cdot J_р / J_э$). Нормативную интенсивность горизонтального пути при скоплении – 2,25 чел/(с·м) при площади проекции 0,1 м² – расчётный поток превышает при базовой конфигурации и не достигает при откалиброванной. Различие ёмкости узлов по типу эксперимент показывает величиной 1,59 раза при одной ширине 2,4 м: короткий проём 2,30 против поворота 1,45 чел/(с·м). В расчёте при откалиброванной конфигурации оно составляет 1,31 раза при том же порядке. Меры согласия по всему ряду из семи узлов и числа по каждой точке приведены в приложении Г8 и разделе 2.4.

2.5.5 ВЫВОД

Скопление при слиянии и время его рассасывания воспроизводят решение пособия при откалиброванной конфигурации во всех задачах, кроме одной, а при базовой расчётное время эвакуации больше решения, потому что нормативный предел двери на выходе ниже предела по виду пути, заложенного в решение. В Т-образном узле опыта Jülich, где двери нет, при базовой конфигурации расчётный поток больше измеренного и расчётное время прохода узла служит оценкой снизу, а при откалиброванной конфигурации, где профиль составлен из измеренных в опыте скорости свободного движения и кривой «скорость–плотность», расчётный поток совпадает с измеренным в допуске.

2.6 Проёмы и сужения

2.6.1 ЯВЛЕНИЕ

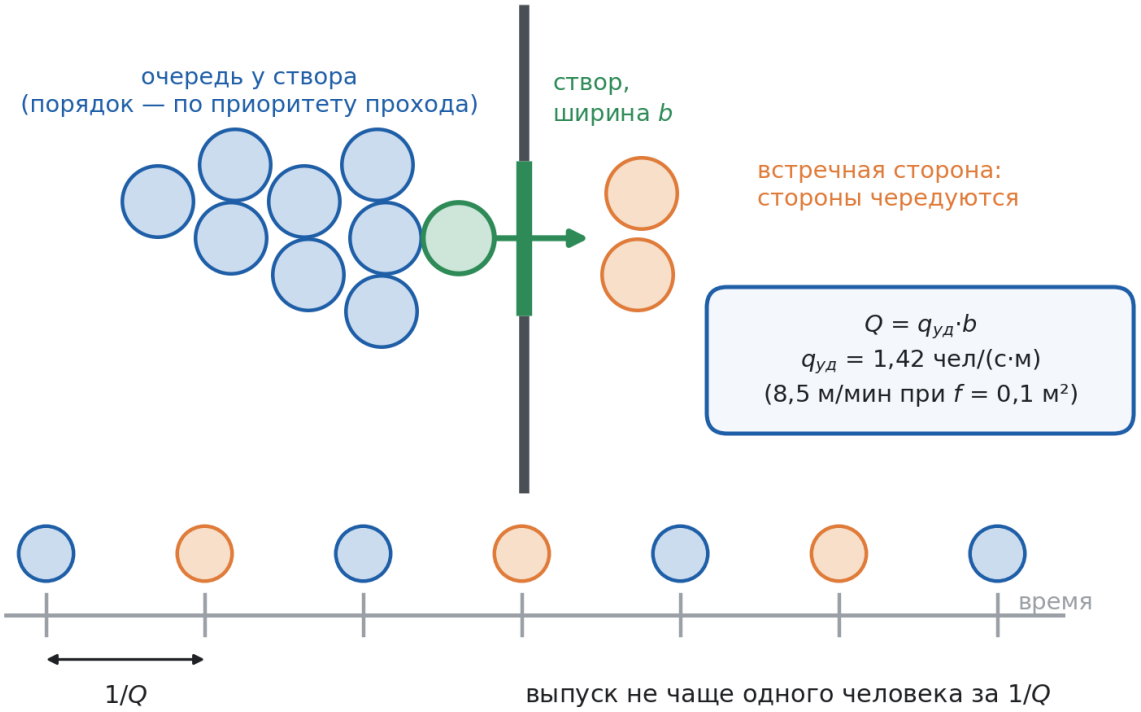
Дверной проём – самое узкое место пути эвакуации: перед ним поток уплотняется, и через створ в единицу времени проходит не больше людей, чем допускает его ширина. Наибольший удельный поток через проём, ёмкость створа, в экспериментах составляет 1,45…3,75 чел/(с·м) и растёт с шириной. Методика ограничивает поток через дверной проём сверху: q_{max} = 19,6 м/мин и интенсивность при максимальной плотности q_{Dmax} = 8,5 м/мин при b ⩾ 1,6 м, 2,5 + 3,75·b при более узких проёмах [1, табл. П2.8]. В формулу (П2.1) методика вводит также коэффициент влияния проёма m. Предел потока проёма определяет расчётное время эвакуации из помещений с большим числом людей, поэтому его реализация проверяется подробнее других. Удельный поток через створ и его зависимость от ширины проёма сравниваются с таблицей методики, с задачами пособия и с натурными опытами по проёму. Так же сравниваются время прохода последнего человека и плотность скопления перед створом.

2.6.2 РЕАЛИЗАЦИЯ В МОДЕЛИ

Проём воспроизводит объект «дверь»: ребро расчётной сетки, помеченное как дверное. Расчётчик задаёт такой объект там, где в стене есть проём: отверстие, которое с обеих сторон уже стены. Такой же объект стоит на выходе из расчётной области, и дверь выхода удаляет дошедшего агента из расчёта. На границах расчётных участков одного коридора, на перекрёстках и на входе в участок меньшей ширины без дверного полотна объект «дверь» не задаётся: такое сужение воспроизводится самой моделью движения. Автоматической классификации сечений в ядре нет: проёмом считается заданный объект, поэтому от разбивки пути расчётчиком зависит, где предел потока будет действовать.

Ёмкость створа задаёт сама модель движения: без дополнительного ограничения удельный поток через створ составляет 2,4…3,1 чел/(с·м) при профиле М0-3 и 1,4…2,0 при профиле, кривая «скорость–плотность» которого измерена в опытах Jülich (приложение Г8). Эту величину задают площадь горизонтальной проекции человека и кривая «скорость–плотность» его профиля. Чем меньше проекция и чем выше скорость при высокой плотности, тем больше людей проходит через метр ширины створа за секунду. Первое ограничение табл. П2.8 (q_{max} = 19,6 м/мин) выполняется поэтому и без назначенного предела. Полоса у стен и кромок створа, в которой выбор направления шага получает штраф, во всех расчётах документа равна нулю: его ширину она не уменьшает и в вычисление предела не входит.

Заданный предел действует как расписание выпуска: при пределе потока Q, чел/с, через створ проходит не чаще одного агента в 1/Q секунд. Подошедшие становятся в очередь и проходят створ в назначенные моменты времени. Перед створом растёт плотность, а за ним поток разрежается. Предел ограничивает мгновенный выпуск и действует только в сторону уменьшения: увеличить поток он не может.



Без заданного предела потока ядро ограничений не назначает: очередь и поток через дверь определяются только геометрией и взаимодействием людей.

Рисунок 21. Предел потока проёма в модели: подошедшие агенты становятся в очередь у створа, и через створ проходит не чаще одного агента за 1/Q секунд

Предел вычисляется в одном из двух режимов, и какой из них действует, выбирает расчётчик. В первом режиме, положении по умолчанию и базовой конфигурации расчёта, предел задан значением в чел/(с·м) и умножается на ширину створа, взятую по геометрии проёма. Во втором, режиме УАМ, предел вычисляется по ходу расчёта для каждого проёма и всякий раз при смене его состояния. Расчёт ведётся по упрощённой аналитической модели приложения № 6 методики: Q = q·b/(60·f), где f – площадь проекции первого агента в очереди. Интенсивность q для сечения участка принимается по (П2.2). Скорость в неё входит по кривой (П2.1). Для проёма без скопления q берётся по (П6.4), а при скоплении – по q_{Dmax} табл. П2.8 для ширины b. Признак скопления даёт условие (П6.7) [1].

Предел 1,42 чел/(с·м) получен из табл. П2.8, которая задаёт пределы в единицах методики, в м/мин: это площадь горизонтальных проекций людей, проходящих через метр ширины створа за минуту. Для дверного проёма при ширине b ⩾ 1,6 м интенсивность при максимальной плотности q_{Dmax} равна 8,5 м/мин [1, табл. П2.8]. Чтобы перевести её в число людей в секунду на метр ширины, интенсивность делят на 60 с и на площадь горизонтальной проекции человека f = 0,1 м². Эту площадь методика принимает для взрослого в летней одежде [1, табл. П2.5]. Итог: 8,5/(60 · 0,1 м²) = 1,42 чел/(с·м). Так получен предел потока проёма базовой конфигурации расчёта. Второе ограничение той же таблицы, q_{max} = 19,6 м/мин, в тех же единицах составляет 3,27 чел/(с·м).

Обязательность ограничения методика вводит прямой оговоркой:

> *вне зависимости от типа используемой модели значение $q_{max\ i}$ и значение интенсивности при максимальной плотности $q_{Dmax\ i}$, м/мин, для потоков любого состава не должны превышать значений, приведённых в таблице П2.8 [1, прил. № 2].*

Оговорка обращена к расчётной модели любого типа, а не к отдельной задаче, поэтому предел встроен в ядро как её параметр и в базовой конфигурации действует на всех объектах «дверь».

Требование табл. П2.8 на проёмах уже 1,6 м при базовой конфигурации не выполняется. Для такого проёма та же таблица задаёт вместо 8,5 м/мин ветвь q_{Dmax} = 2,5 + 3,75·b. При b = 0,8…1,4 м она даёт 5,50…7,75 м/мин, или 0,92…1,29 чел/(с·м). При выключенном режиме УАМ ядро эту ветвь не применяет: предел задан одним числом и от ширины створа не зависит. На проёмах уже 1,6 м предел базовой конфигурации выше требования табл. П2.8, и расчётный удельный поток превышает требуемый на +9,8… +50,8 % (шаг «Верификация»). Расчётчик, которому требуется соблюдение ветви, задаёт для узкого проёма предел по ней, q_{Dmax}/(60·f). При b = 0,8 м и f = 0,1 м² это 0,92 чел/(с·м). Другой путь – включить режим УАМ, в котором ветвь вычисляется по ходу расчёта. То же относится к границам расчётных участков, где объекты дверей не задаются (раздел 2.5).

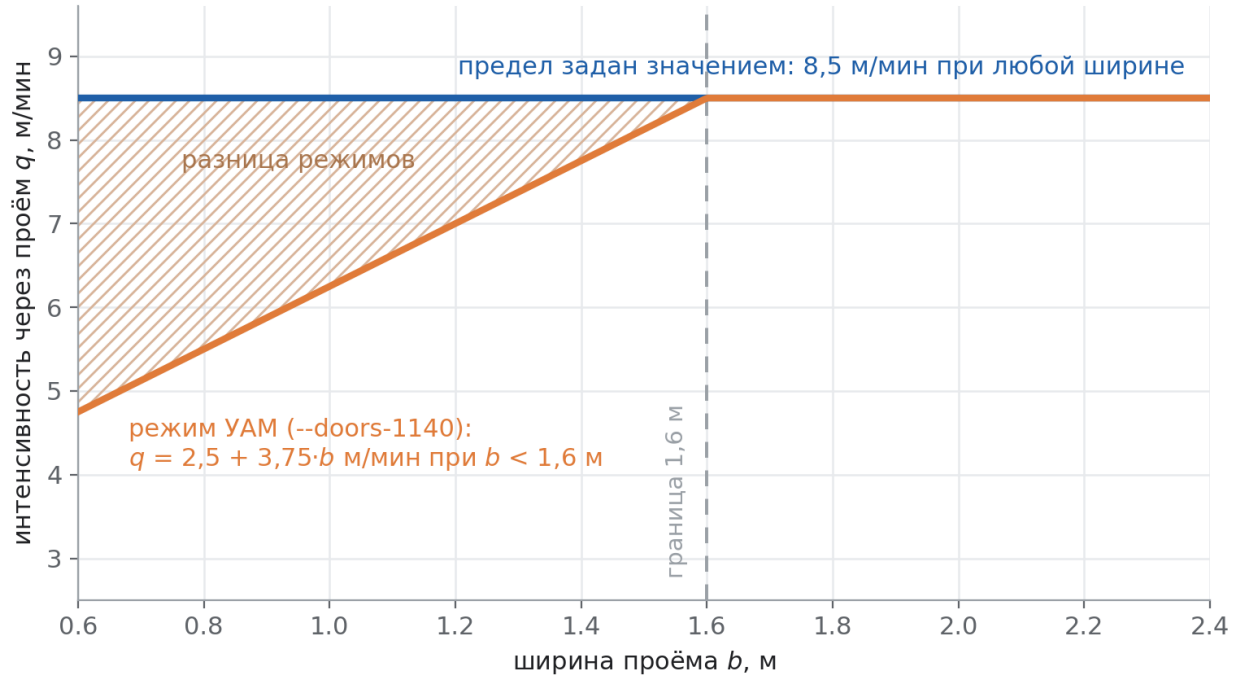
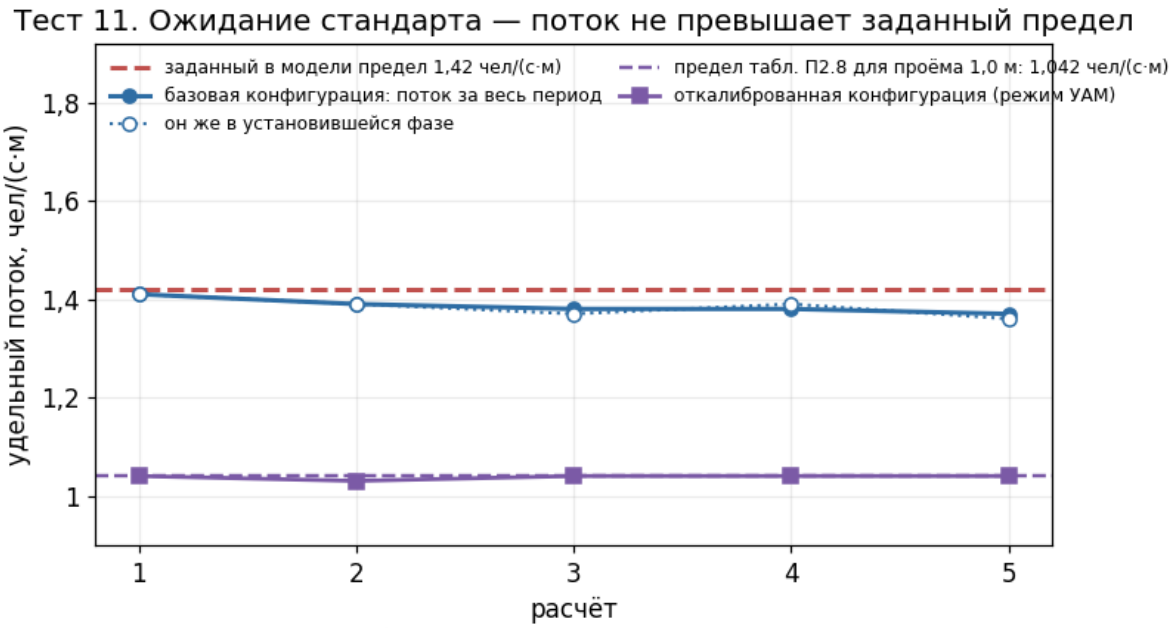


Рисунок 22. Предел интенсивности через проём в зависимости от его ширины: ветвь 2,5 + 3,75·b табл. П2.8 для проёмов уже 1,6 м, применяемая в режиме УАМ, и единое значение 8,5 м/мин, когда этот режим выключен

2.6.3 ВЕРИФИКАЦИЯ

Контрольных постановок три: критерий стандарта ISO 20414, таблица П2.8 методики и аналитическое решение пособия. Допуск ±10 %.

Постановка теста 11 стандарта ISO 20414: плита 8 × 5 м, проём 1,0 м, 100 человек, пять расстановок, модель агента задана стандартом ISO 20414. Критерий теста: поток через выход не должен превышать заданного модели предела [5]. Эталонного времени постановка не задаёт. При базовой конфигурации удельный поток составляет 1,37…1,41 чел/(с·м): предел 1,42 не превышен ни в одном из пяти расчётов, по верху диапазона отклонение равно −0,7 %. Порог 1,33 чел/(с·м) циркуляра IMO [6] превышен во всех пяти расчётах на +3,0…+6,0 %. В режиме УАМ предел понижается до 1,042 чел/(с·м) при расчётном потоке 1,040, или −0,2 %. Приложение Г1.



Источник: результаты/тест11.csv; откалиброванная конфигурация — расчёт тех же моделей при включённом режиме УАМ.

Рисунок 23. Тест 11 стандарта ISO 20414, удельный поток через проём 1,0 м по пяти расчётам при двух конфигурациях расчёта. В базовой предел равен 1,42 чел/(с·м). Откалиброванная ведётся в режиме УАМ с пределом 1,042 чел/(с·м)

Предел интенсивности по табл. П2.8 проверен на шести ширинах. Постановка: комната 8 × 5 м, 200 человек профиля М0-3 при плотности расстановки 5 чел/м², проём шириной 0,8…2,0 м в стене. Удельный поток измеряется в установившейся фазе, между 15 и 85 % прошедших. Сравнение ведётся со значением табл. П2.8 для той же ширины.

Таблица 19. Удельный поток через проём против требования табл. П2.8, м/мин при f = 0,1 м²

Ширина проёма b, м	Требование табл. П2.8	Базовая конфигурация	Отклонение	Откалиброванная конфигурация (режим УАМ)	Отклонение
0,8	5,50	8,29	+50,8 %	5,50	0,0 %
1,0	6,25	8,41	+34,5 %	6,25	−0,1 %
1,2	7,00	8,45	+20,8 %	6,99	−0,2 %
1,4	7,75	8,51	+9,8 %	7,74	−0,1 %
1,6	8,50	8,52	+0,3 %	8,50	−0,1 %
2,0	8,50	8,50	0,0 %	8,50	0,0 %

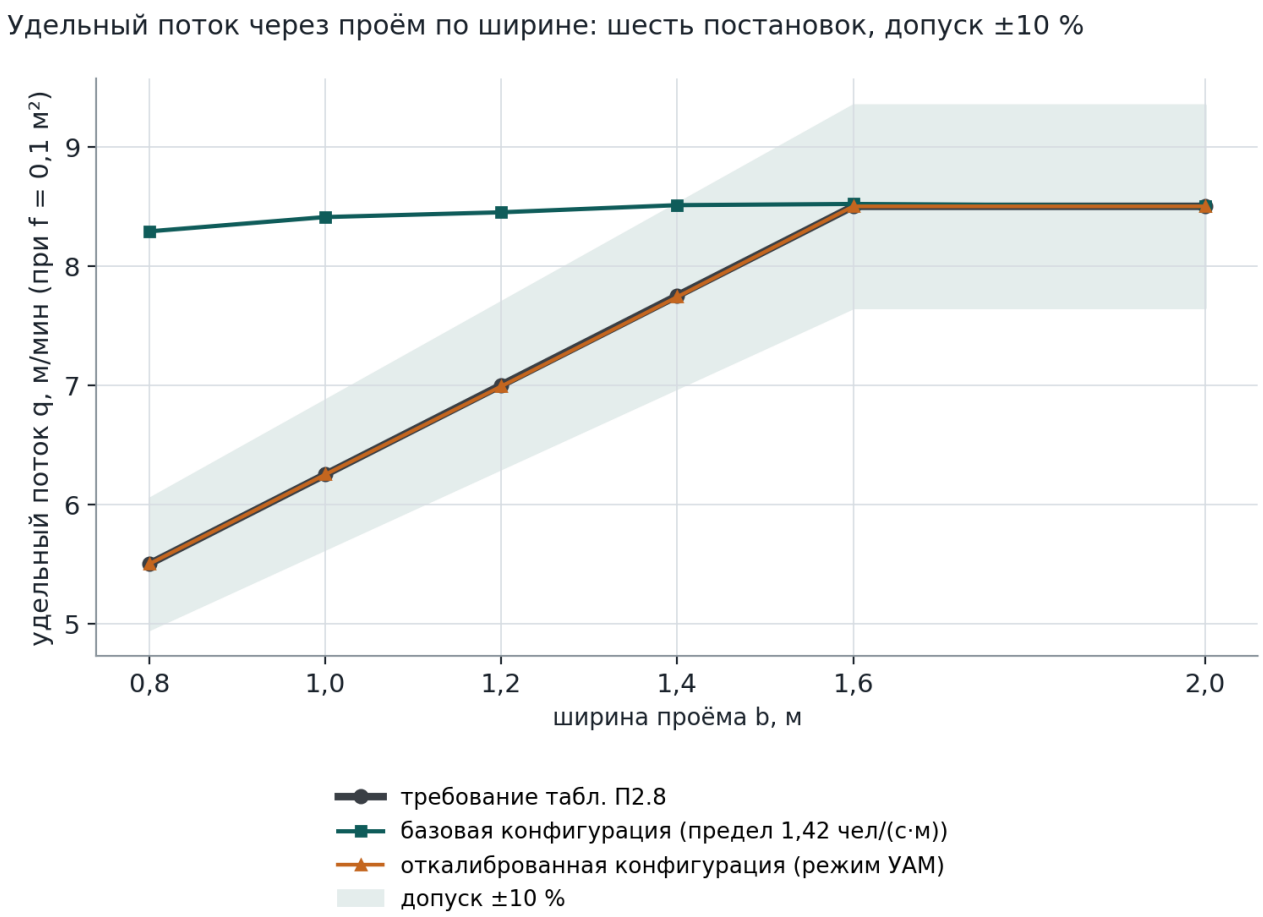


Рисунок 24. Удельный поток через проём по шести ширинам при двух конфигурациях расчёта. В базовой предел равен 1,42 чел/(с·м), откалиброванная ведётся в режиме УАМ. Полоса допуска ±10 % около требования табл. П2.8

При базовой конфигурации расчётный удельный поток составляет 8,29…8,52 м/мин на всех шести ширинах проёма и от неё не зависит, тогда как требование табл. П2.8 меняется от 5,50 до 8,50. В допуск ±10 % входят три ширины из шести (1,4; 1,6 и 2,0 м), а на проёмах 0,8; 1,0 и 1,2 м он выше требуемого. В пересчёте это означает оценку снизу: при проёме 0,8 м и 200 человек расчётное время выхода составляет 179,8 с против 272,8 с, отвечающих табл. П2.8, или −34,1 %. В режиме УАМ отклонение не превышает 0,2 %, и в допуск входят все шесть ширин. Второе ограничение таблицы выполняется и без заданного предела: наибольшая интенсивность составляет 15,44…19,18 м/мин при требуемых 19,6. Приложения Г2 и Г12.

В задачах пособия 10-2…27-2 аналитическим решением служит время выхода последнего человека с участка 20 × 2 м, вычисленное по его формулам [10], а не взятое из печатных таблиц (они округлены до 2,1 %). Восемнадцать задач с проёмом в торце: 10-2…18-2 при b = 1,2 м и 19-2…27-2 при b = 0,8 м, N = 40…360 человек. При базовой конфигурации отклонение составляет −35,3…+59,7 % при среднем модуле 28,5 %, и в допуск ±10 % не входит ни одна задача. В семнадцати задачах из восемнадцати расчётное время эвакуации меньше аналитического решения, в задаче 10-2 при наименьшем числе людей – больше. В режиме УАМ отклонение равно −1,3…+16,0 % при среднем модуле 1,1 %, и в допуск входят 17 задач из 18. Вне допуска остаётся задача 10-2 (+16,0 %), где скопление у проёма не успевает установиться. По всем 27 задачам пособия, включая девять с открытым торцом 2,0 м (раздел 2.3), средний модуль отклонения уменьшается с 41,7 до 1,3 %. Приложение Г3.

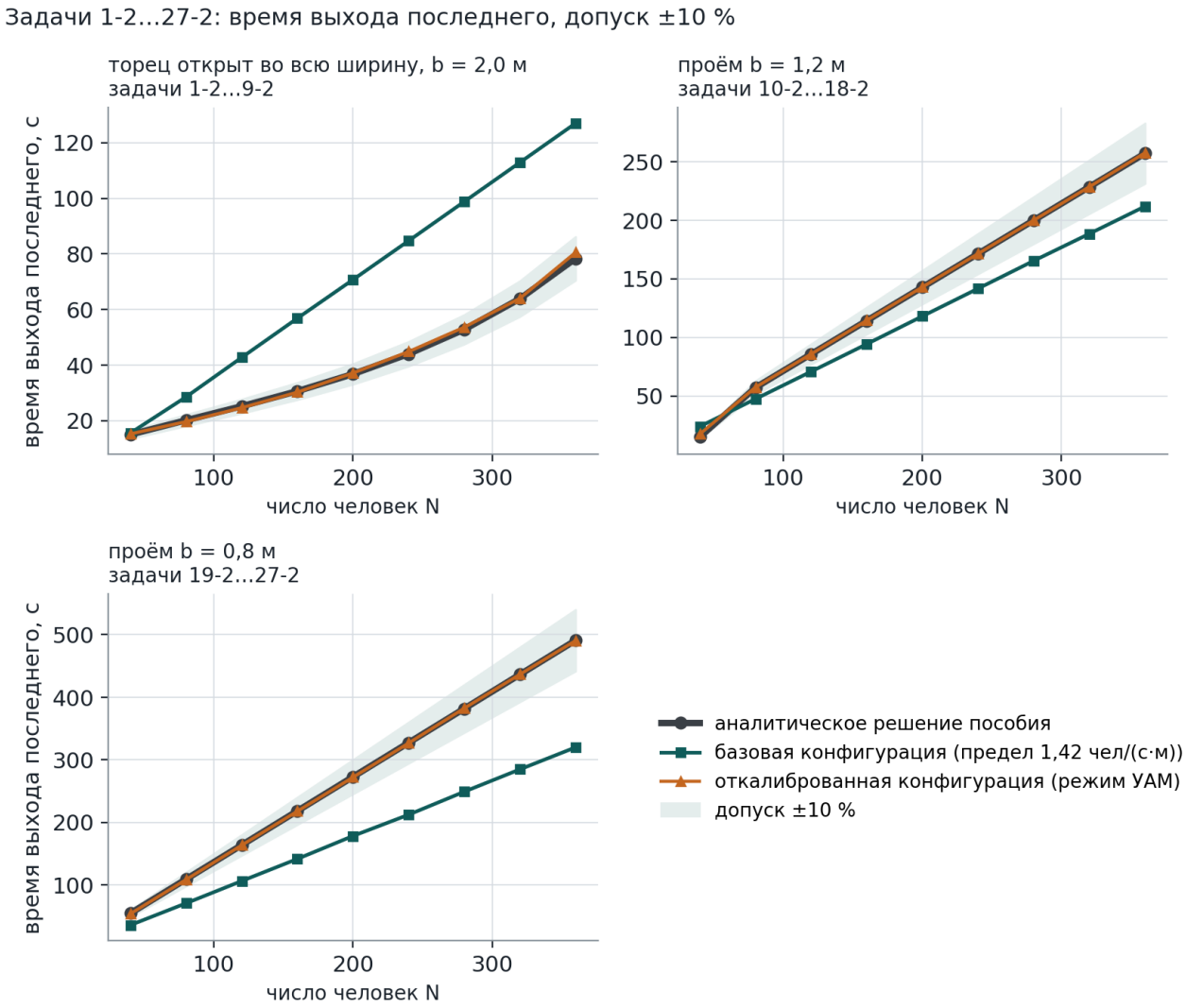


Рисунок 25. Задачи 1-2…27-2, время выхода последнего человека по числу людей для трёх ширин створа: аналитическое решение пособия, базовая конфигурация расчёта с пределом 1,42 чел/(с·м) и откалиброванная в режиме УАМ. Полосы на рисунке дают собственный допуск источника ±5 % и ±10 % документа

2.6.4 ВАЛИДАЦИЯ

Экспериментальных источников по проёму пять, в них 72 точки. Коридорный опыт Jülich 2009 разобран в разделе 2.3. Допуск ±20 %. В каждом опыте измерена ёмкость створа, и она выше нормативного предела 1,42 чел/(с·м). Этим определяется знак отклонения.

Казарма Дюссельдорф 2006.

Источник данных	A. Seyfried и группа Forschungszentrum Jülich, казарма Дюссельдорф, ноябрь 2006: 13 опытов через проём шириной 0,9…2,5 м и глубиной 0,06…4,0 м, по 170…179 участников, сняты траектории каждого [28;29;35]
Критерий оценки	валидация: время прохода последнего через створ, 34,4…106,7 с, при измеренной в опытах ёмкости створа 1,75…2,53 чел/(с·м); допуск ±20 %, для сведения – меры ISO 20414 при ERD ⩽ 0,45 и EPC 0,6…1,4 [5;43]
Расчётная модель	геометрия по метаданным архива; время начала эвакуации ноль, расстановка равномерно-случайная при 2,6 чел/м², пять начальных чисел расстановки на опыт
Конфигурации расчёта	базовая: профиль M0-3 [1, табл. П2.3], предел потока проёма 1,42 чел/(с·м) · откалиброванная: профиль составлен из измеренных в коридорном опыте Jülich 2009 скорости свободного движения V_0 = 1,55 м/с и кривой «скорость–плотность» при табличной площади проекции 0,10 м² и без изменений перенесён на казарму; ограничение потока проёма снято, поскольку ёмкость створов измерена в самом опыте и составляет 1,75…2,53 чел/(с·м)

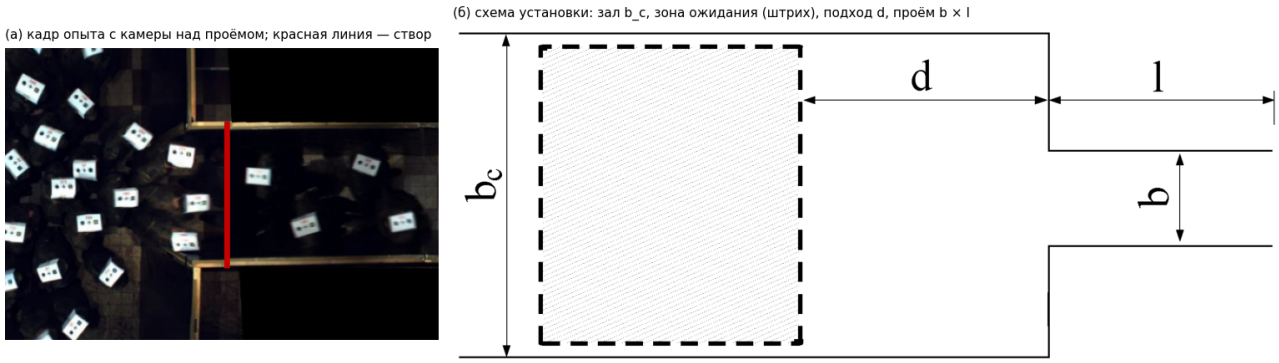


Рисунок 26. Опыт «казарма Дюссельдорф 2006»: кадр с камеры над проёмом и схема установки (по [28], рис. 2)

При базовой конфигурации расчётное время эвакуации больше экспериментального во всех 13 опытах на +31…+74 %, и в допуск ±20 % не входит ни один опыт (ERD 0,57, EPC 0,64). Расчёт даёт оценку сверху: нормативный предел 1,42 чел/(с·м) ниже измеренной ёмкости створа на 20…45 %, и через створ за секунду проходит меньше людей, чем в опыте. При откалиброванной конфигурации отклонение составляет −6,9…+21,5 %, и в допуске 12 из 13 (ERD 0,18, EPC 0,87, SC 0,95). Изменены два параметра: профиль по измеренным в опыте величинам и снятое ограничение потока проёма. Числа по каждому опыту приведены в приложении Г6.

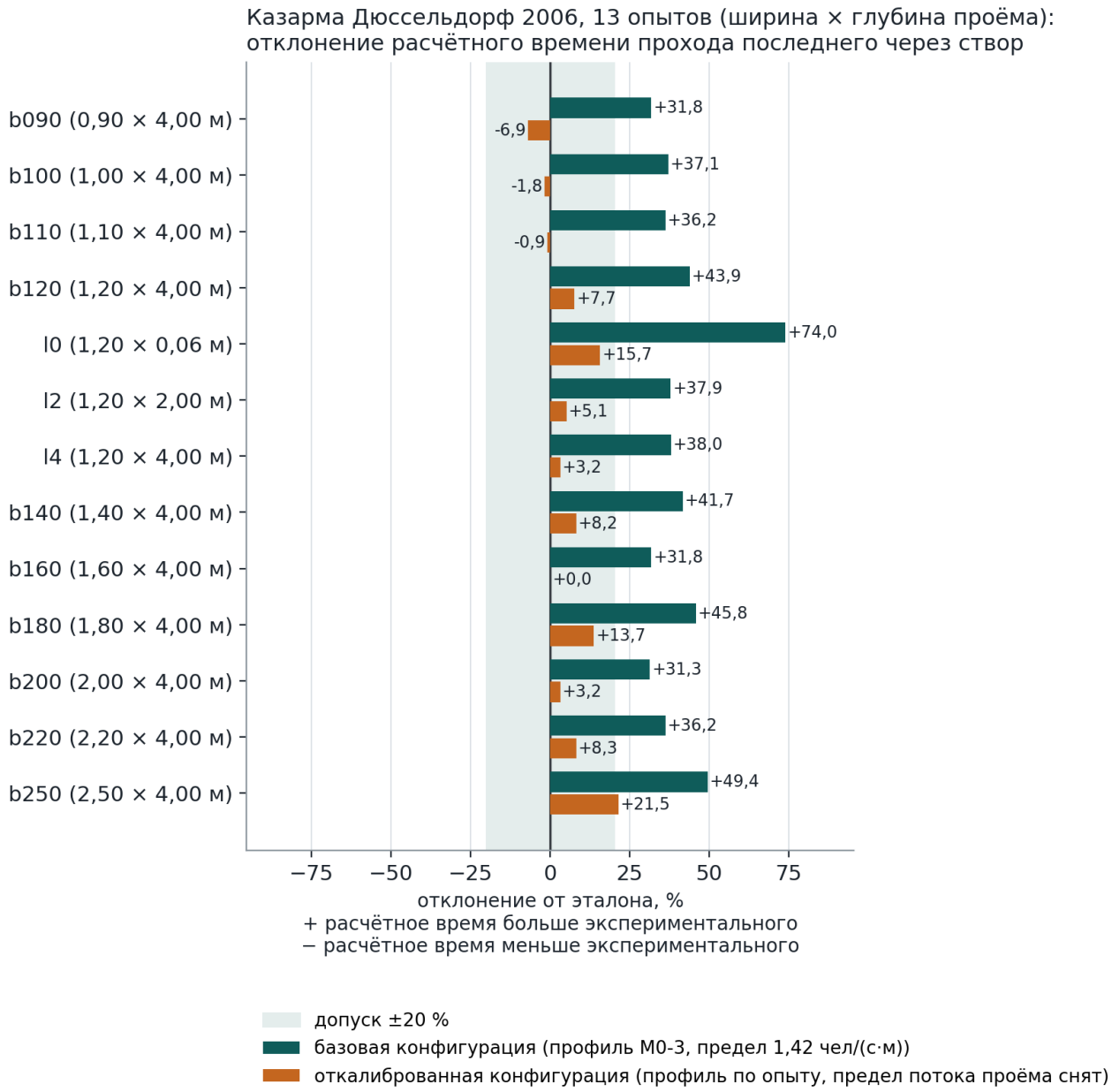
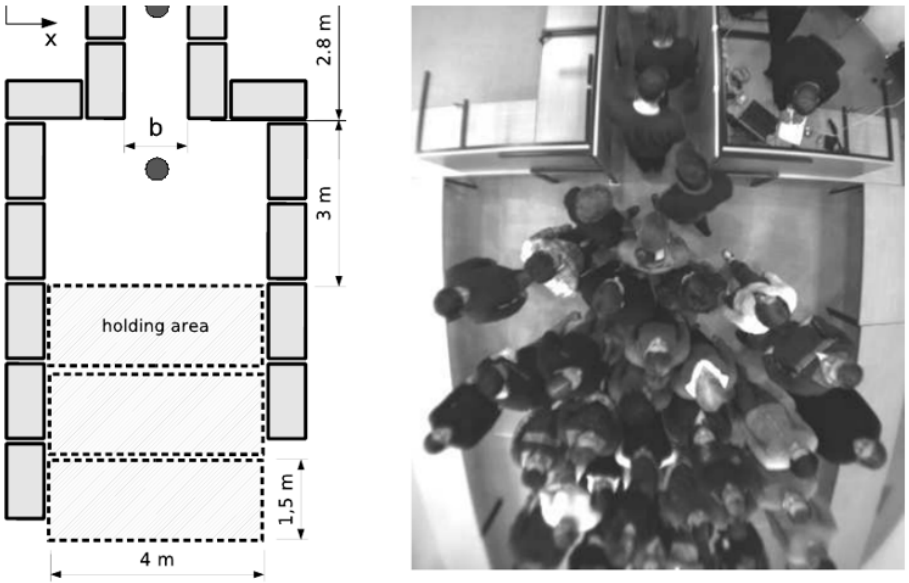


Рисунок 27. Казарма Дюссельдорф 2006, 13 опытов: отклонение расчётного времени прохода последнего от экспериментального при двух конфигурациях расчёта. Базовая ведётся с профилем M0-3 и пределом 1,42 чел/(с·м), откалиброванная – с профилем по измеренным V_0 и кривой «скорость–плотность» и без ограничения потока проёма. Полоса допуска ±20 %

Лабораторные ряды по ширине проёма: Seyfried 2005, Kretz 2006.

Источник данных	два независимых лабораторных ряда: A. Seyfried и др., 7 декабря 2005 г., ротонда Forschungszentrum Jülich – узкое место длиной 2,8 м и шириной 0,8…1,2 м, 15 опытов по 20, 40 и 60 участников [27;35]; T. Kretz, A. Grünebohm, M. Schreckenberg, 2006 – проём 0,4…1,6 м между шкафами, 94 участника [34]; с обобщённой линией серии J = 1,90·b на ширинах 0,7…5,0 м [32] – 30 точек
Критерий оценки	валидация: удельный поток через проём – 1,93 чел/(с·м) у первого ряда при собственном разбросе между опытами ±9 %, 1,91 у второго в диапазоне 0,4…1,0 м, 1,90 у обобщённой линии; допуск ±20 %, для сведения – ERD ⩽ 0,45 и EPC 0,6…1,4 [43]
Расчётная модель	прямоугольный зал, проём заданной ширины, выход; три начальных числа расстановки на каждую из 30 точек
Конфигурации расчёта	базовая: профиль M0-3, летняя одежда [1, табл. П2.6], предел потока проёма 1,42 чел/(с·м) · откалиброванная: предел потока проёма 1,90 чел/(с·м) – ёмкость створа, измеренная в казарме Дюссельдорф 2006 (приложение Г6) и совпадающая с уровнем самих лабораторных рядов 1,90…1,93 чел/(с·м); профиль остаётся табличным

Две установки одной задачи: поток через проём переменной ширины



а) Seyfried и др.: зал 4 м, размеченные зоны ожидания, узкое место длиной 2,8 м шириной 0,8…1,2 м; справа — фото перед входом (по Seyfried и др., 2009, рис. 2)



б) Kretz и др.: проём между двумя шкафами глубиной 0,4 м, ширина 0,4…1,6 м, зал 4 × 9 м, 94 участника стоят вплотную к проёму (по Kretz и др., 2006, рис. 1)

Оба ряда — лаборатория, студенты и сотрудники, движение «без спешки, но целенаправленно»; измеряется одна и та же величина — удельный поток через створ, чел/(с·м).

Рисунок 28. Две установки одной задачи. Установка (а) – узкое место длиной 2,8 м и шириной 0,8…1,2 м, по [27], рис. 2. Установка (б) – проём 0,4…1,6 м между шкафами, по [34], рис. 1

При базовой конфигурации расчётный удельный поток ниже экспериментального во всех 30 точках на −44,5…−14,3 % (ERD 0,299, EPC 1,405), одинаково по всем трём рядам. В допуск ±20 % входят две точки ряда Зайфрида. Расчётное время выхода соответственно больше экспериментального: это оценка сверху. При откалиброванной конфигурации отклонение равно −31,6…+6,6 % (ERD 0,131, EPC 1,110), и в допуске 27 точек из 30. Вне допуска остаются три точки (Кретц b = 0,4 м, Зайфрид b = 1,0 м при N = 40 и b = 1,2 м при N = 20), где расчётный поток ниже измеренного. Точка ряда Кретца при b = 1,2 м в его выводы не входит: за проёмом в опыте образуется скопление. Приложение Г7.

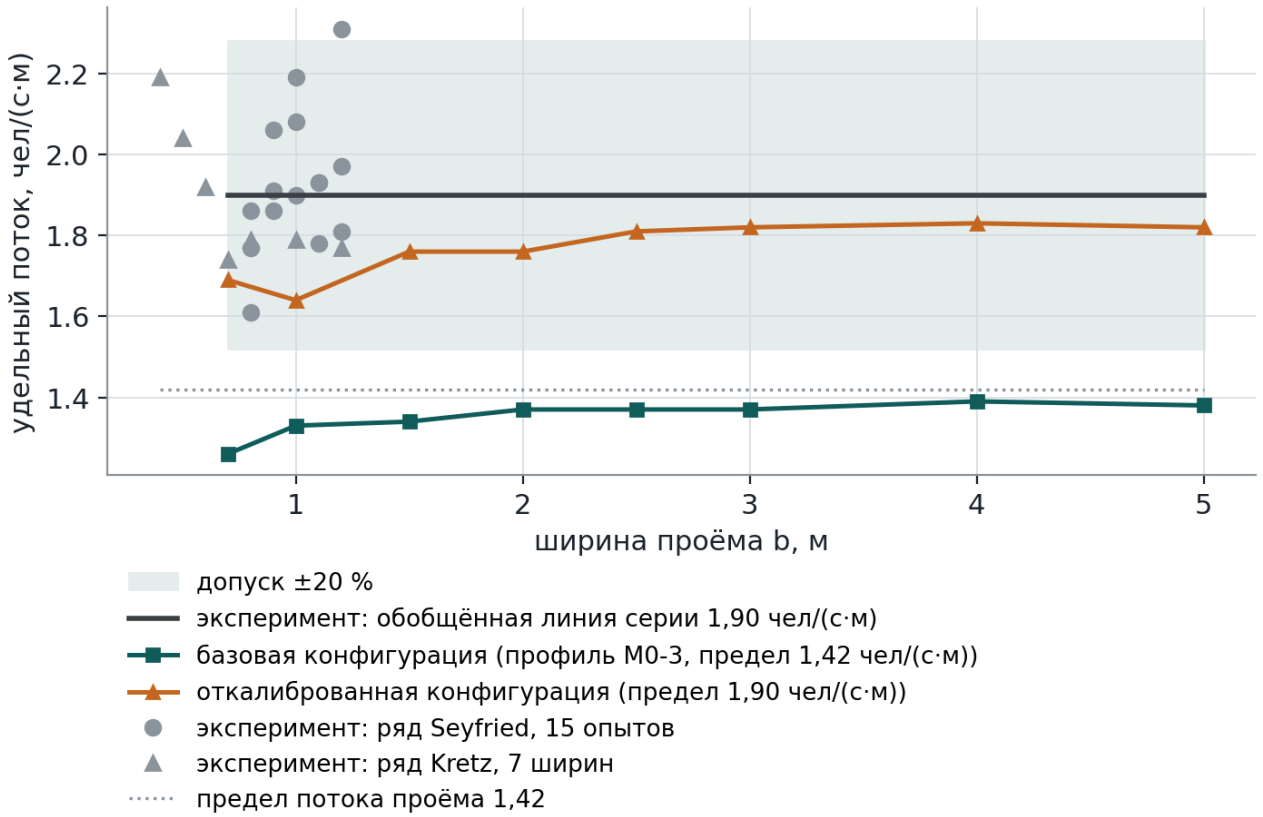


Рисунок 29. Удельный поток через проём в зависимости от ширины: уровень 1,90 чел/(с·м) обобщённой линии серии, точки обоих измеренных рядов и две конфигурации расчёта. В базовой предел равен 1,42 чел/(с·м). В откалиброванной он равен 1,90 чел/(с·м)

Узлы Jülich: короткий проём и длинное сужение.

Источник данных	Forschungszentrum Jülich, опыты 2006 и 2009 гг.: короткий проём в стене глубиной 0,06 м и длинное сужение глубиной 4,0 м при ширинах 1,2 и 2,4 м, сняты траектории каждого участника [31;28;35]; поворот 90° и T-образное слияние той же серии – разделы 2.4 и «Слияние потоков»
Критерий оценки	валидация: ёмкость узла – короткий проём 2,30, длинное сужение 1,90 чел/(с·м); допуск ±20 % по точке, для сведения по ряду из семи точек – ERD ⩽ 0,45 и EPC 0,6…1,4 [43]
Расчётная модель	подводящие коридоры, узел и зал за ним заданы одним помещением, объекты «дверь» внутри не задаются; расстановка равномерно-случайная при 3,5 чел/м², пять начальных чисел расстановки на точку; семь точек, по 35 расчётов при каждой конфигурации
Конфигурации расчёта	базовая: профиль M0-3 [1, табл. П2.3]; предел потока проёма 1,42 чел/(с·м) в сечении узла без объекта «дверь» не действует · откалиброванная: профиль составлен из измеренных в коридорном опыте Jülich 2009 скорости свободного движения V_0 = 1,55 м/с и кривой «скорость–плотность» при табличной площади проекции 0,10 м²

Этот опыт показывает, каким получается поток через сужение, когда предел не действует: объекта «дверь» в узле нет, и ёмкость задают кривая «скорость–плотность» и площадь проекции профиля. При

базовой конфигурации расчётный удельный поток выше измеренного во всех четырёх точках на +23,5… +62,5 %, в допуск ±20 % не входит ни одна. При откалиброванной конфигурации отклонение составляет −17,5…−4,4 %, и в допуске четыре точки из четырёх. Итог по всему ряду из семи узлов, куда входят также поворот и Т-образное слияние, и меры согласия ERD и EPC приведены в разделе 2.4. При базовой конфигурации знак здесь обратный знаку опытов с проёмом: там, где предел не действует, расчётный поток больше измеренного, и расчётное время эвакуации меньше экспериментального. Приложение Г8.

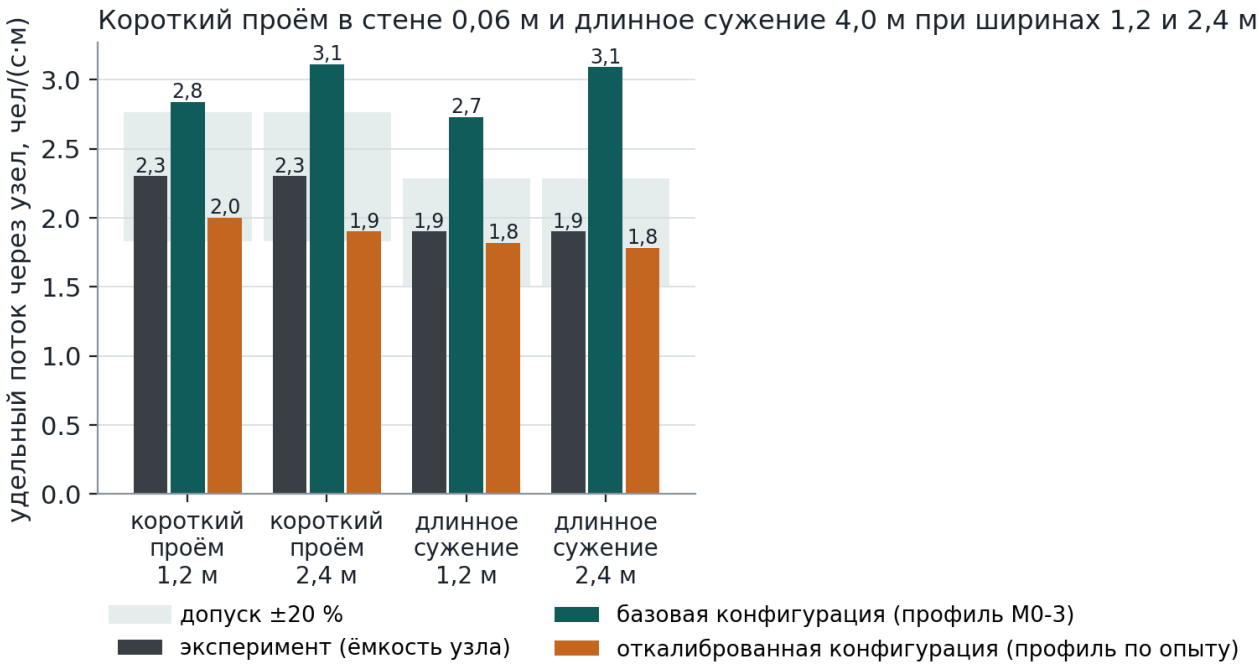


Рисунок 30. Короткий проём 0,06 м и длинное сужение 4,0 м глубиной при ширинах 1,2 и 2,4 м: удельный поток через узел по измерениям опыта и при двух конфигурациях расчёта. Базовая ведётся с профилем М0-3, откалиброванная – с профилем по измеренным V_0 и кривой «скорость–плотность». Полоса допуска ±20 %

Опыты Академии ГПС: комната 2 × 2 м и проём 0,8 м.

Источник данных	Д. А. Самошин, Академия ГПС МЧС России: комната 2 × 2 м с проёмом 0,88 м при N = 4…35 (тест на точность моделей эвакуации, 2019) [26]; коридор 2 × 6 м с проёмом 0,8 м, летняя и зимняя серии [25]; способ постановки наблюдений – [12, с. 28–31]. Контингент – курсанты в форменной одежде; десять точек с проёмом из тринадцати точек опыта
Критерий оценки	валидация: время выхода по каждой точке; допуск ±20 %, для сведения – собственный допуск источника ±25 %
Расчётная модель	постановки собраны по описаниям опытов, проёмы заданы геометрией, время начала эвакуации ноль; точка – среднее по десяти случайным расстановкам
Конфигурации расчёта	базовая: профиль М0-3 – учебные заведения, класс Ф4.2 [1, табл. П2.3], предел потока проёма 1,42 чел/(с·м) · откалиброванная: профиль курсанта по условиям того же опыта – площадь горизонтальной проекции по антропометрии контингента (0,08 / 0,10 м² вместо 0,10 / 0,125, проходной диаметр 0,24 вместо 0,28 м), V_0 = 1,66 вместо 1,667 м/с и кривая «скорость–плотность» по скоростям, измеренным в коридоре того же опыта, время разгона 1,1 вместо 1,5 с; ограничение потока проёма снято, поскольку ёмкость створов измерена в опыте и составляет 1,46…3,63 чел/(с·м)

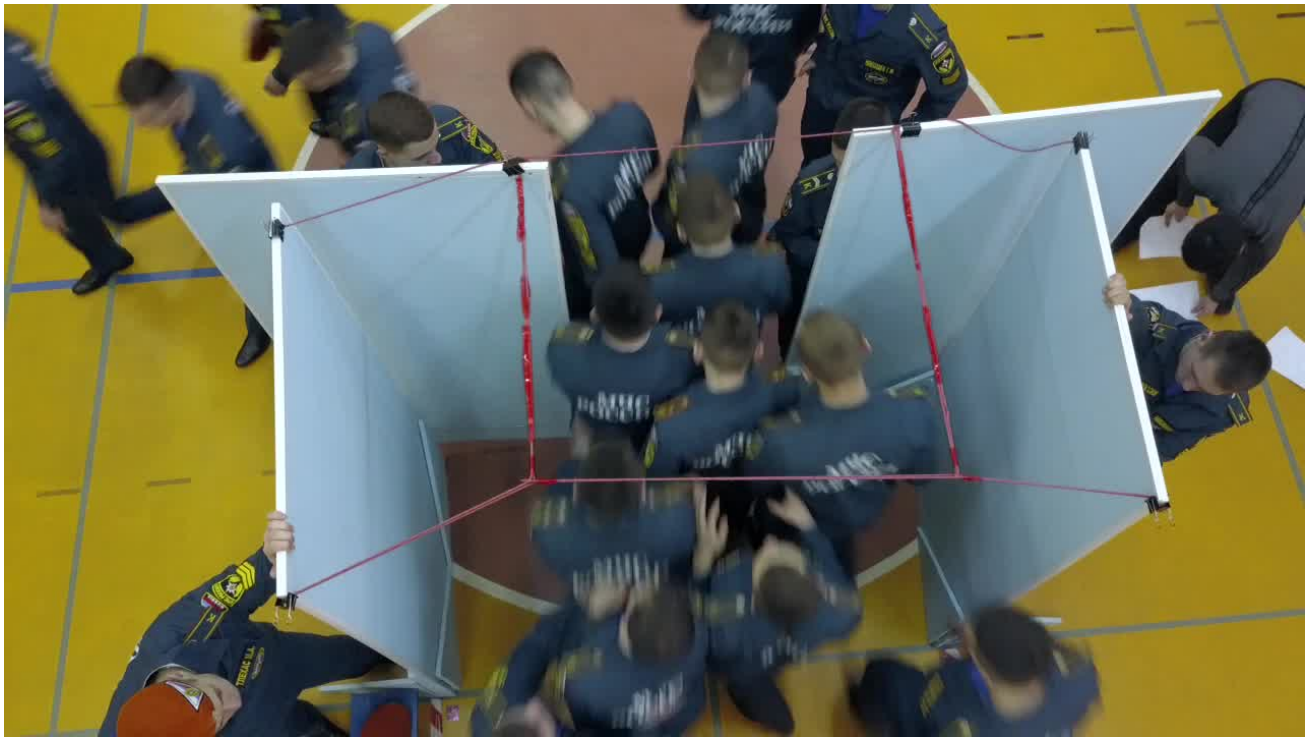


Рисунок 31. Опыт с проёмом 0,8 м: 29 курсантов проходят проём, съёмка сверху. У проёма область повышенной плотности (по [25])

При базовой конфигурации расчётное время эвакуации больше экспериментального во всех десяти точках с проёмом на +53,1…+161,2 % (+1,7…+16,7 с), и в допуск ±20 % не входит ни одна точка. По всем тринадцати точкам опыта в допуске две. Расхождение создаёт соотношение предела с измеренной ёмкостью: курсанты проходят проём 0,8 м с удельным потоком 2,63…3,63 чел/(с·м), вдвое выше нормативных 1,42. При откалиброванной конфигурации отклонение по десяти точкам с проёмом

составляет −15,6…+17,4 % при среднем модуле 8,0 %, и в допуске все десять. По всем тринадцати точкам средний модуль уменьшается с 92,8 до 7,8 %, в допуске тринадцать. Расчётное время эвакуации больше экспериментального в шести точках с проёмом и меньше в четырёх. Профилем методики измеренный поток не воспроизводится по двум причинам сразу: шаг очереди равен диаметру круга 0,357 м против 0,280 м малой оси эллипса табл. П2.5, а измеренная в этом опыте скорость при плотности 2 чел/м² на четверть выше той, что даёт кривая (П2.1). Приложение Г9.

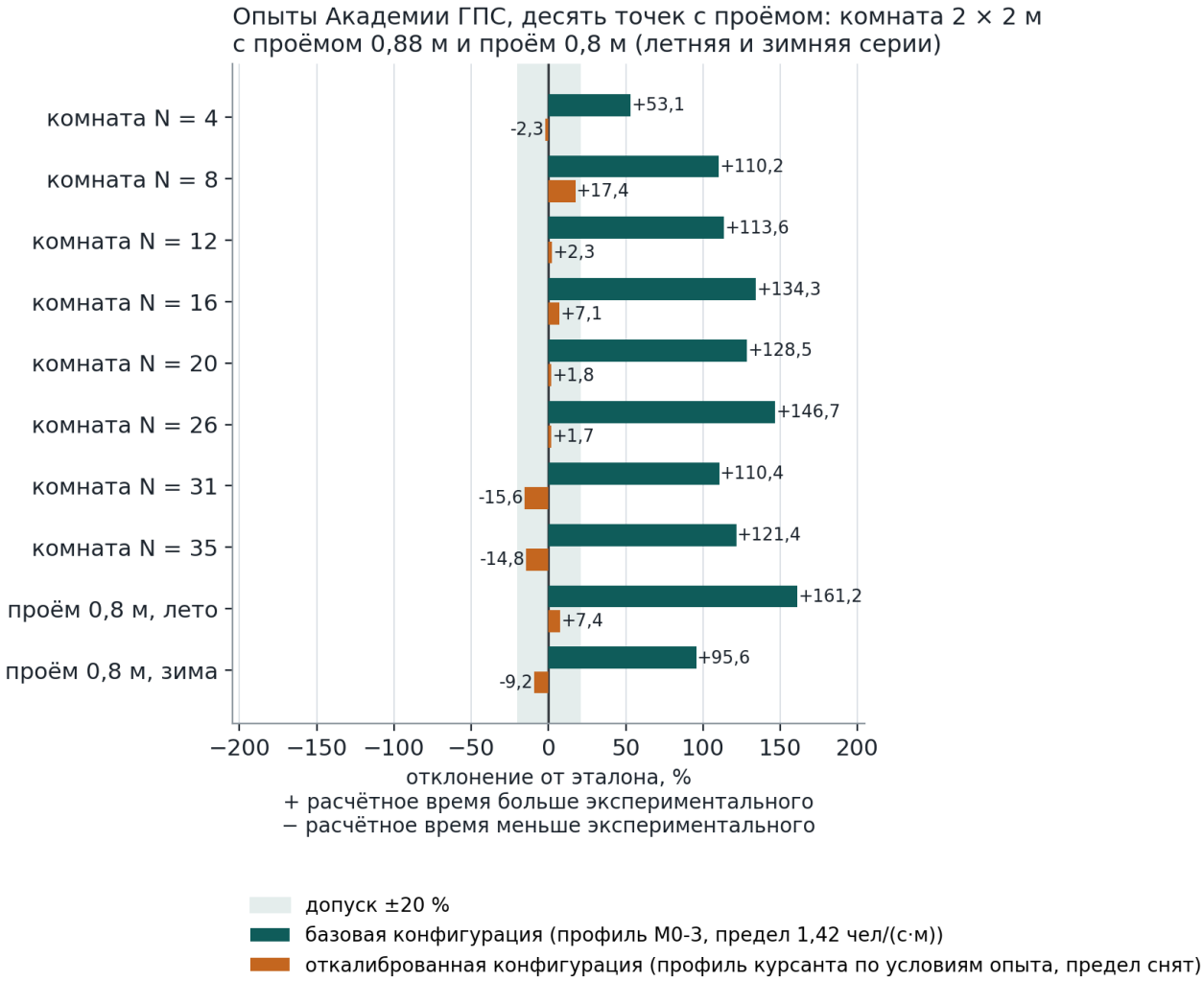


Рисунок 32. Опыты Академии ГПС, десять точек с проёмом: отклонение расчётного времени эвакуации от экспериментального при двух конфигурациях расчёта. Базовая ведётся с профилем M0-3 и пределом 1,42 чел/(с·м), откалиброванная – с профилем курсанта по условиям опыта и без ограничения потока проёма. Полоса на рисунке даёт допуск ±20 % документа

Российские опыты по проёму.

Источник данных	А. И. Милинский, 1951 – наблюдения у проёмов зданий массового назначения [18]; В. А. Копылов, 1972–1974 – универмаг, метрополитен и эксперимент в трансформируемом манеже [19;24]; В. М. Предтеченский и Т. А. Тарасова – метрополитен [23]. Ряды сведены в [11, с. 172–182], постановки – [12, с. 28–31;7]; пятнадцать точек, ширины 0,7…2,5 м
Критерий оценки	валидация: наибольший удельный поток серии опыта, 1,585…3,751 чел/(с·м); допуск ±20 %
Расчётная модель	комната 8 × 5 м, проём ширины b в стене 5 м, 200 человек, равномерная шестиугольная расстановка при 5 чел/м²; поток измеряется между 15 и 85 % вышедших; 180 расчётов
Конфигурации расчёта	базовая: профиль M0-3 – в манеже Копылова по классу здания (Ф4.2 либо Ф4.4 [1, табл. П2.3]), в трёх наблюдениях по контингенту опыта (смешанный поток); предел потока проёма 1,42 чел/(с·м) · откалиброванная: в опытах Милинского и наблюдениях Копылова предел потока проёма 1,796 чел/(с·м) – среднее наибольшее значение шести серий Милинского; в манеже Копылова профиль M0-2 по фактическому контингенту (юноши 18–25 лет) без ограничения потока проёма; в наблюдении Тарасовой без ограничения потока проёма (ёмкость створа измерена и равна 2,20 чел/(с·м))

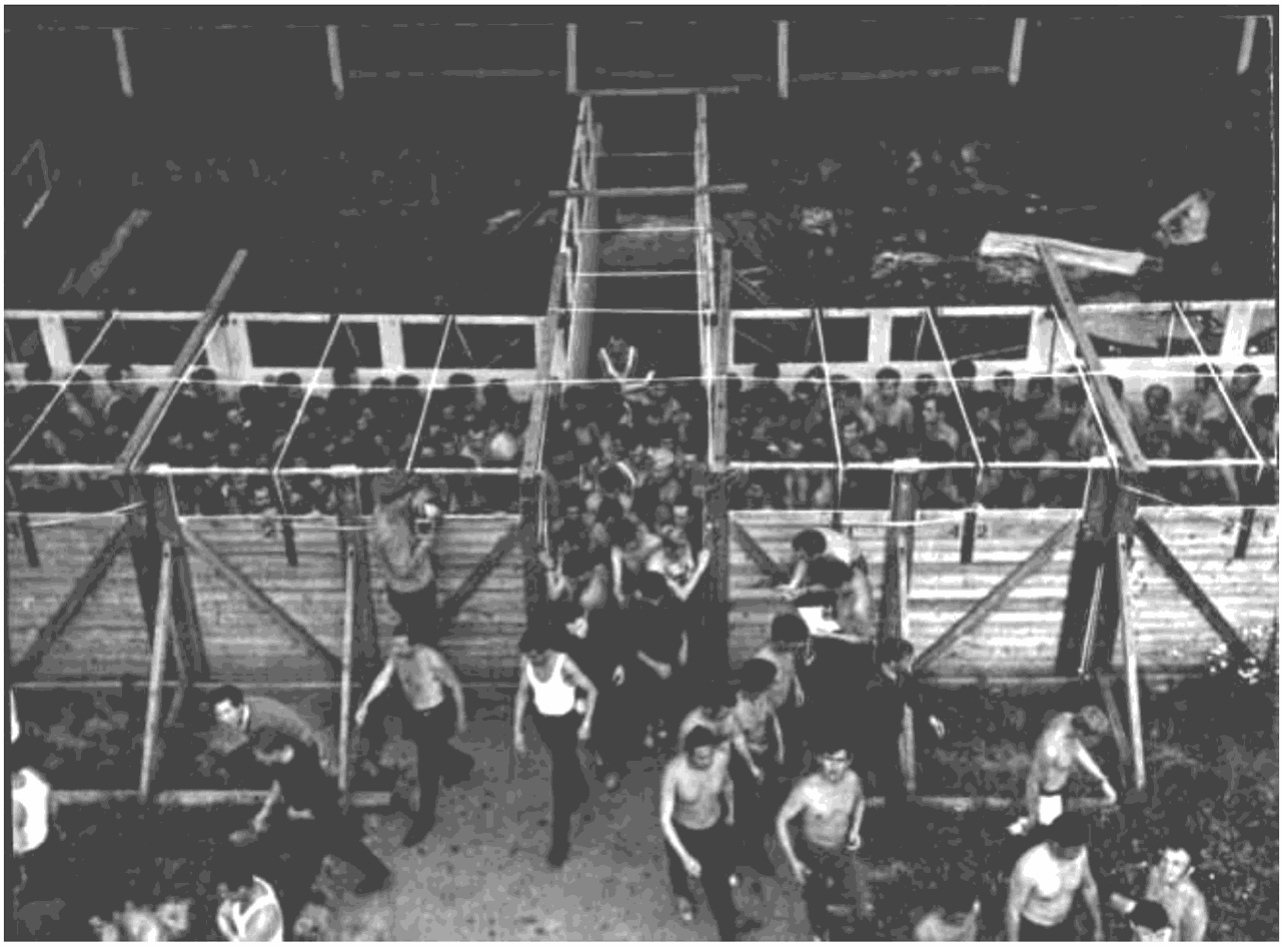


Рис. 2.4. Трансформируемый манеж для проведения экспериментов

Рисунок 33. Трансформируемый манеж В. А. Копылова: фотография опыта (по [12], рис. 2.4)

При базовой конфигурации расчётный удельный поток составляет 1,31…1,42 чел/(с·м) независимо от ширины проёма и ниже измеренного во всех пятнадцати точках на −62,2…−10,4 %. В допуске ±20 % три точки из них. Расчётное время выхода соответственно больше экспериментального: это оценка сверху во всех пятнадцати точках. Наибольшее расхождение приходится на манеж Копылова, где измеренный поток достигает 3,22…3,75 чел/(с·м): участниками там были юноши 18–25 лет, а нормативный профиль назначается по классу здания. При откалиброванной конфигурации отклонение равно −15,1…+12,4 % при среднем модуле 5,4 %, и в допуске все пятнадцать точек. В четырёх точках манежа оно составляет −5,7…+4,6 % при профиле по фактическому контингенту, в одиннадцати наблюдениях – −15,1…+12,4 % при пределе 1,796 чел/(с·м) либо без ограничения потока проёма. Разброс замеров источники не публиковали, поэтому отнести расхождение к погрешности эксперимента нельзя. Приложение Г11.

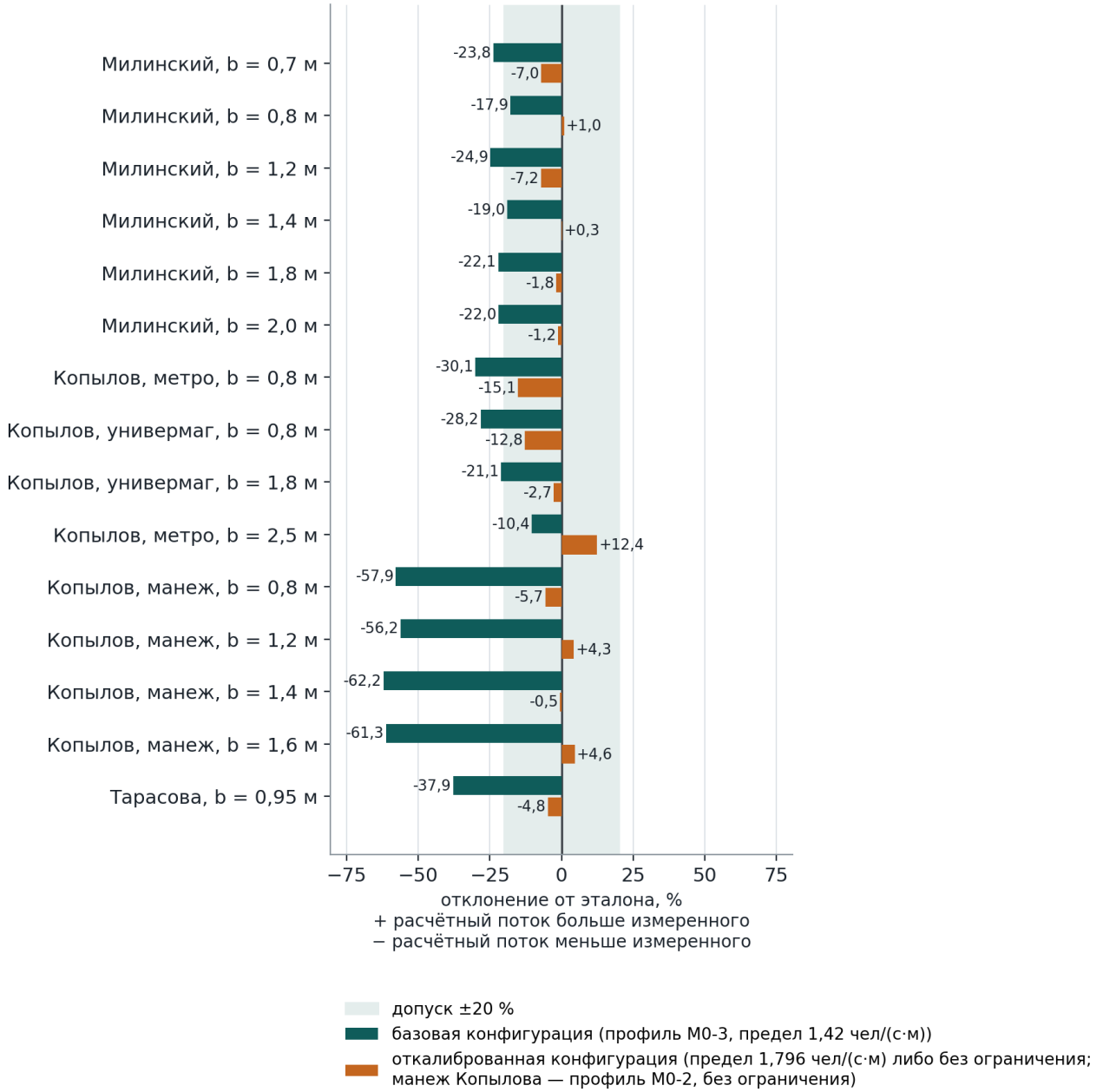


Рисунок 34. Отклонение расчётного удельного потока от измеренного по пятнадцати точкам четырёх российских опытов при двух конфигурациях расчёта. Базовая ведётся с профилем M0-3 и пределом 1,42 чел/(с·м). Откалиброванная ведётся с пределом 1,796 чел/(с·м) либо без ограничения, а в манеже Копылова с профилем M0-2 по фактическому контингенту. Полосы на рисунке дают ориентир ±10 % и допуск документа ±20 %

2.6.5 ВЫВОД

Предел потока проёма реализован верно (тест ISO 11, табл. П2.8 в режиме УАМ), а поскольку измеренная ёмкость створа во всех пяти источниках выше нормативного предела, расчётное время эвакуации при базовой конфигурации больше экспериментального во всех точках, чем и обосновано применение предела в расчёте пожарного риска.

2.7 Лестницы и пандусы

2.7.1 ЯВЛЕНИЕ

По лестнице человек идёт медленнее, чем по горизонтали, вниз быстрее, чем вверх, а путь считается по наклонной длине марша. На площадках поток поворачивает, а на входе в лестничную клетку в него вливаются люди с этажа. Методика задаёт для лестницы вниз и вверх собственные скорости свободного движения, коэффициенты кривой «скорость–плотность» [1, табл. П2.6, П2.7] и предельные интенсивности [1, табл. П2.8]. Пандус уклоном не круче 1:8 отнесён к горизонтальным путям. В многоэтажном здании лестница – основной путь эвакуации, и время выхода определяется её пропускной способностью. Проверяются по тестам стандарта ISO 20414 и таблицам методики скорость на марше вверх и вниз, рост потока с шириной марша и цепочка скоплений перед входом на лестницу. Согласование с экспериментом ведётся по времени выхода населения десяти лестничных клеток офисных зданий NIST.

2.7.2 РЕАЛИЗАЦИЯ В МОДЕЛИ

Лестница задаётся маршами с подступёнком и проступью. Расчётчик описывает геометрию (число ступеней, размеры подступёнка и проступи, ширину марша, площадки и двери на концах маршей), а уклон, признак лестницы и наклонную длину пути ядро вычисляет само. Марш распознаётся по глубине проступи (не более 0,33 м) и уклону, направление движения задаёт знак перепада высот. Скорость свободного движения на марше профиль хранит отдельно для лестницы вниз и вверх. В профилях методики это скорости табл. П2.6: у М0-3 100 м/мин вниз и 60 м/мин вверх при 100 м/мин по горизонтальному пути [1, табл. П2.6]. Записаны они долями горизонтальной скорости, 1,0 и 0,6, и от уклона марша не зависят. Путь считается по наклонной длине марша, как предписывает п. 10 приложения № 5 методики, а не по его заложению в плане.

Кривая «скорость–плотность» принимается по профилю отдельно для четырёх видов наклонного пути: лестница и пандус, вниз и вверх. В профилях методики это табуляция формулы (П2.1) с коэффициентами табл. П2.6 и П2.7 для соответствующего вида пути, разобранная в разделе 2.3. Пандус воспроизводится как наклонный участок горизонтального пути, кривая для которого выбирается по геометрическому уклону. Уклон 1:8 методика причисляет к горизонтальным путям, и перелом кривой профиля приходится на это значение.

Отдельного правила поворота у агента нет: на промежуточной площадке скорость снижается через модель разгона, а не через назначенный поворотам множитель. Поворотов пути методика не учитывает [1, прил. № 5]. На результат расчёта, кроме геометрии, влияют два решения расчётчика: выбор профиля группы мобильности и оформление концов маршей объектами «дверь». Профиль назначается по контингенту и категории условий движения (раздел 2.2). Предел потока проёма действует только на створе такой двери, а не на самом марше (раздел 2.6).

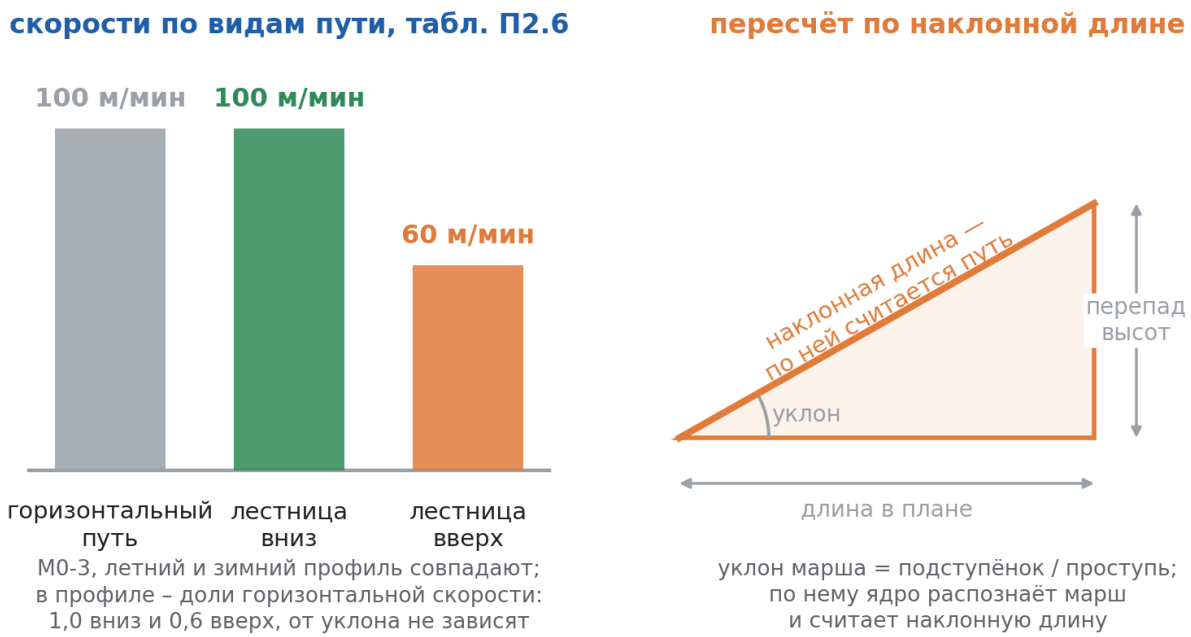


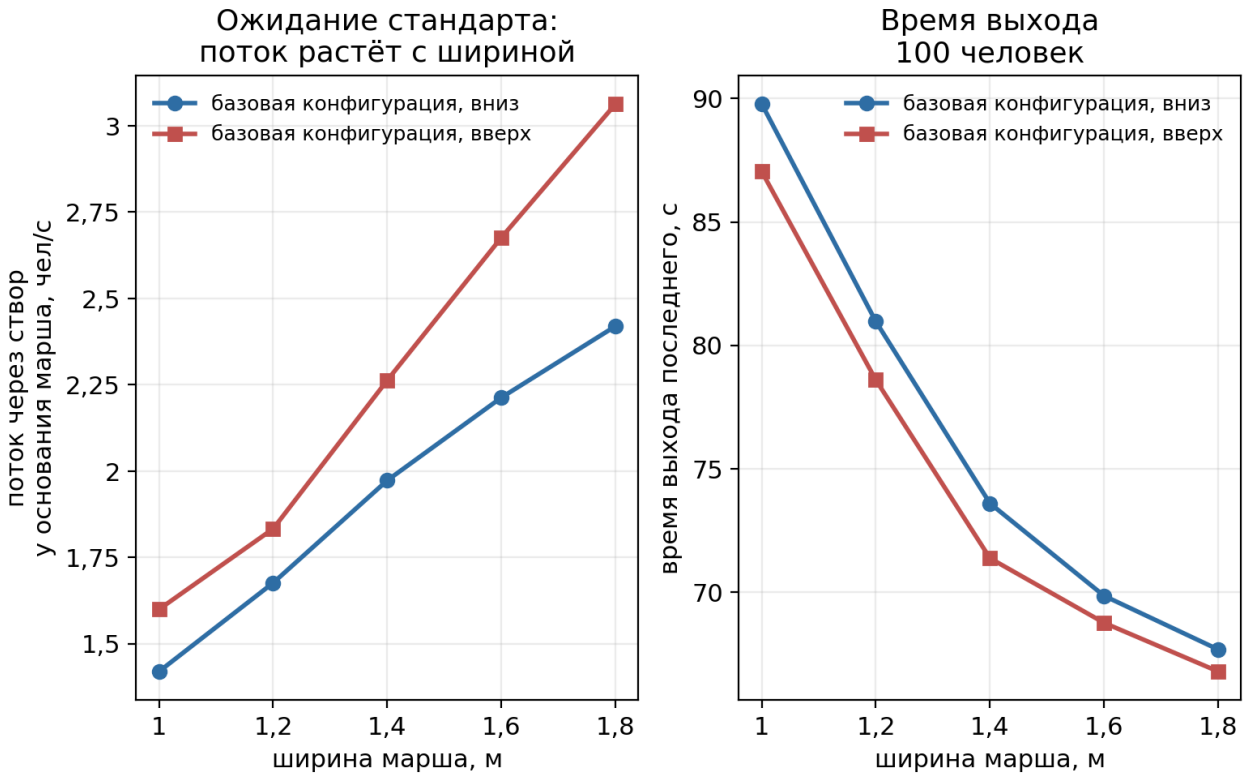
Рисунок 35. Скорости свободного движения профиля М0-3 по видам пути (табл. П2.6) и пересчёт пути по наклонной длине марша

2.7.3 ВЕРИФИКАЦИЯ

Проверка ведётся по трём тестам стандарта ISO 20414 [5] и двум базовым зависимостям приложения № 2 методики [1]. Во всех постановках применена базовая конфигурация расчёта, допуск ±10 %.

Таблица 20. Движение по наклонным путям против аналитических решений и критериев стандарта ISO 20414

Проверка и условия	Требование эталона	Результат расчёта
Тест ISO 3: марш b = 2 м, 10 м по наклону, уклон 45°, скорость на марше задана равной горизонтальной (приложение Г1)	преодоление 10 м за 10 с вверх и вниз	вверх 10,00 с на 9,92 м наклонной длины – скорость 0,992 м/с, **+0,8 %**; вниз 9,90 с на 9,90 м – 1,000 м/с, 0,0 %
Тест ISO 10: 150 человек, комната 10 × 10 м, дверь 1,0 м, коридор 10 × 2 м, марш b = 1,2 м (приложение Г1)	скопления выстраиваются в цепочку	плотность 4,5…4,7 чел/м² у двери комнаты, 0,45…0,50 в коридоре, 0,82…0,90 перед входом на марш; удельный поток через вход на лестницу 1,00…1,11 чел/(с·м); устойчивого скопления на самом марше нет
Тест ISO 12: марш 45° с перепадом 3,0 м при b = 1,0…1,8 м, вниз и вверх (приложение Г1)	росту ширины марша соответствует рост потока	рост монотонный на всех пяти ширинах: вниз 1,42 → 2,42 чел/с, вверх 1,60 → 3,06 чел/с; удельный поток 1,34…1,42 вниз и 1,53…1,70 вверх
Скорость свободного движения марша вверх и вниз, 27 профилей, допуск ±2 % (приложение Г2)	табличные значения [1, табл. П2.6, П2.7, П2.9]	отклонение по модулю не более 1,26 % у профилей табл. П2.6 и П2.7; +1,07 % вниз и +1,50 % вверх у транспортируемых на носилках (табл. П2.9)
Предельная интенсивность лестницы вниз, марши 0,7…3,0 м (приложение Г2)	q_{max} лестницы вниз 16,0 м/мин ≡ 2,67 чел/(с·м) [1, табл. П2.8]	1,29…1,38 чел/(с·м) – вдвое ниже предела марша: поток задаёт дверь на входе на марш, а не сам марш



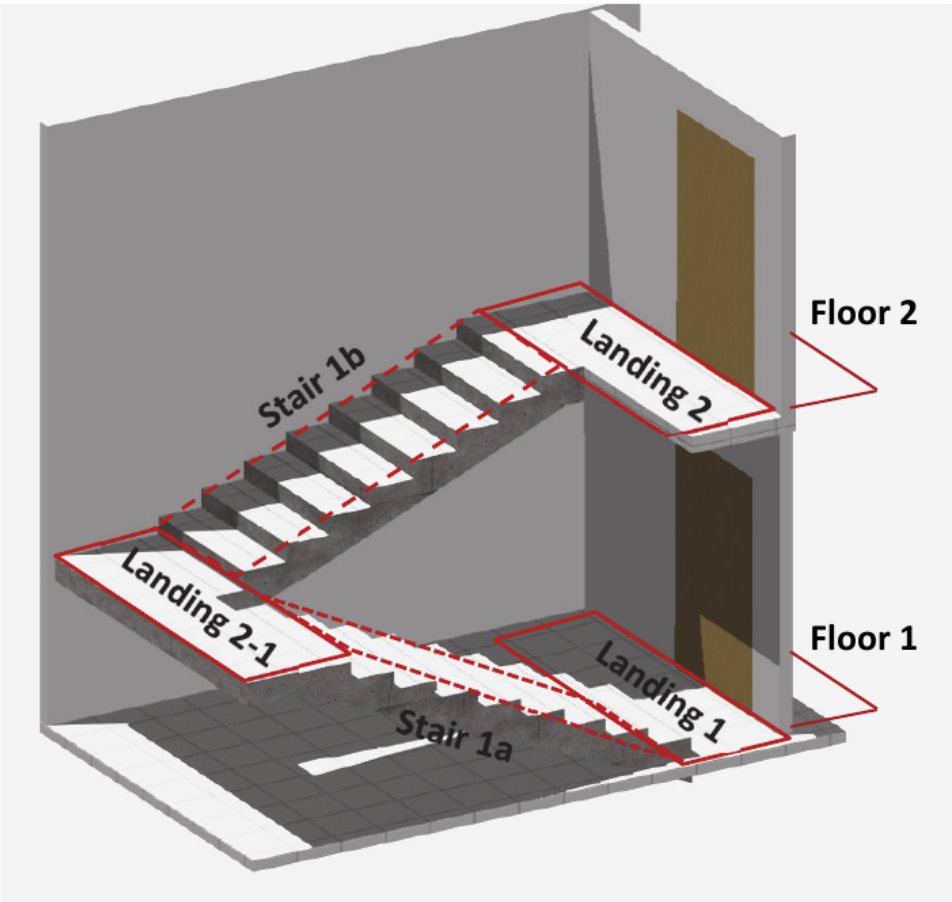
Источник: руководство/данные/тест12.csv, по 3 расчёта на клетку.

Рисунок 36. Тест 12 стандарта ISO 20414: поток у основания марша, чел/с, и время выхода последнего человека в зависимости от его ширины 1,0…1,8 м при движении вниз и вверх. Базовая конфигурация расчёта (профиль М0-3)

Скорость на марше выдерживается вдоль наклона, а не в плане, что отвечает п. 10 приложения № 5 методики. Отклонение +0,8 % в тесте ISO 3 создаёт шаг записи траектории 0,1 с. Все пять проверок входят в свои допуски. Предельная интенсивность самого марша недостижима: поток на лестницу задаёт дверь на входе, и расчётные 1,29…1,38 чел/(с·м) вдвое ниже предела 2,67 табл. П2.8. Наибольшее отклонение табулированной кривой от формулы (П2.1) приходится на лестницу вниз: 5,85 % при 9 чел/м². Приложение Г2.

2.7.4 ВАЛИДАЦИЯ

Источник данных	учебные эвакуации четырёх офисных зданий США (10, 18, 24 и 31 этаж), десять лестничных клеток, около 3 800 человек: сводный отчёт [45] и архив поштучных замеров к нему [46;47;48]
Критерий оценки	валидация: замеренное время выхода 95 % населения каждой лестничной клетки [45, табл. 19], допуск ±20 %; для сведения – собственный критерий источника ±17 %, сходимость, которую на той же величине заявляет его расчётная схема [45, с. 115]
Расчётная модель	на каждую лестничную клетку своя модель: помещение с замеренным населением на каждом населённом этаже, два марша с промежуточной площадкой и поворотом на 180°, дверь выхода внизу; геометрия по [45, табл. 4], время начала эвакуации – замеренная задержка входа в лестничную клетку [45, табл. 18]; шестьдесят расчётов – десять клеток × две конфигурации × три расстановки людей по этажам
Конфигурации расчёта	базовая: профиль M0-3 – профиль офисных зданий [1, табл. П2.3], предел потока проёма 1,42 чел/(с·м) на двери выхода · откалиброванная: профиль M0-7, скорости свободного движения которого (0,75 м/с по горизонтали и 0,50 м/с вдоль наклона марша) отвечают измеренной в учениях комфортной категории условий движения (0,44…0,87 м/с на марше и площадке) [9, табл. 3.5]; параметры профиля табличные [1, табл. П2.6]



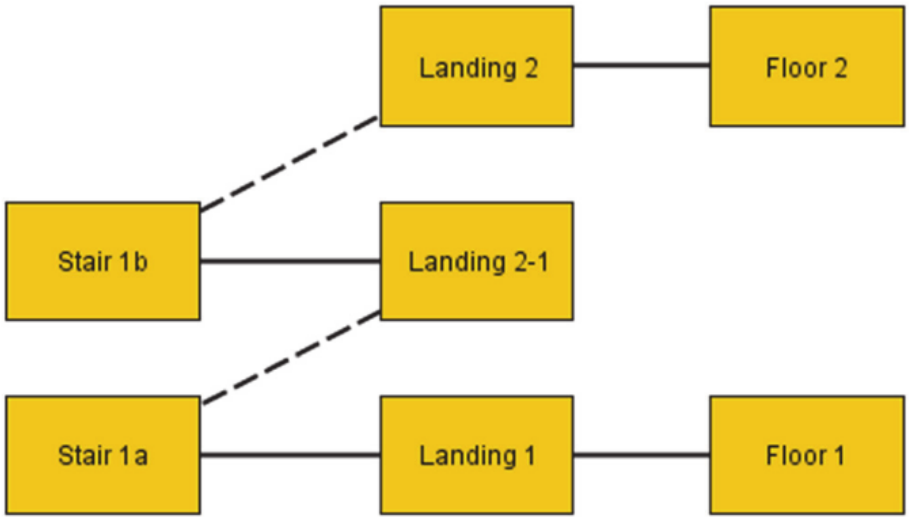


Рисунок 37. Устройство лестничной клетки в зданиях исследования: два марша на этаж, промежуточная площадка, поворот на 180°, дверь с этажа на площадку (по [45], рис. 27)

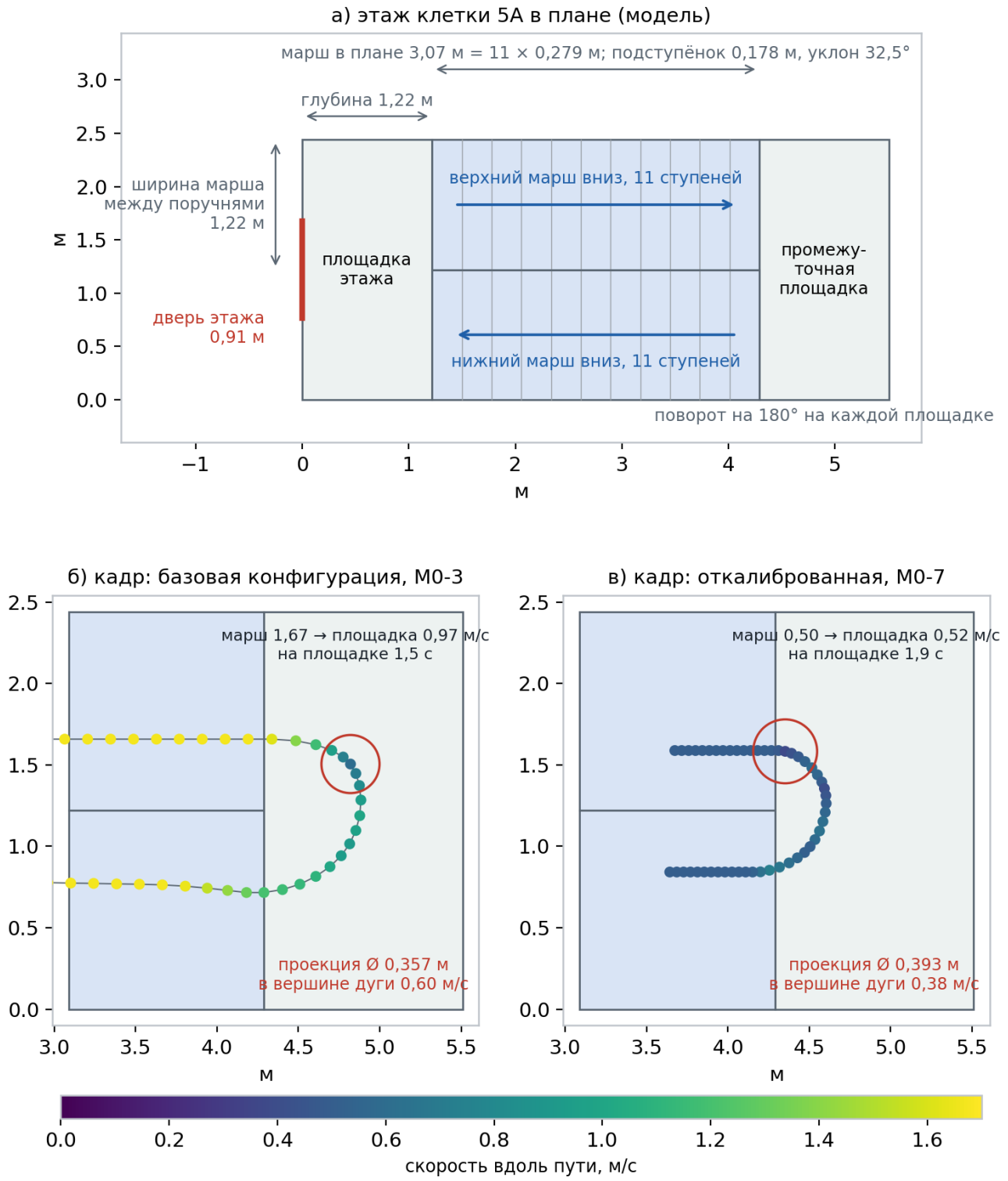


Рисунок 38. Модель лестничной клетки 5А: план этажа с размерами и кадр расчёта – агент на промежуточной площадке, окраска по скорости вдоль пути

При базовой конфигурации расчётное время выхода 95 % населения меньше экспериментального во всех десяти лестничных клетках на −46,9…−13,8 % (в среднем −32,1 %) – это оценка снизу расчётного времени эвакуации. В допуске ±20 % две клетки из десяти, при собственном критерии источника ±17 % – одна. Расчётная скорость движения по клетке составляет 0,94…1,28 м/с против 0,22…0,44 м/с по архиву замеров при ERD 0,19…0,37 и SC 0,66…0,85. Причина – категория условий движения: профиль, предписанный методикой офисным зданиям, отвечает повышенной активности, тогда как учебные эвакуации проходили при комфортной категории.

При откалиброванной конфигурации, где заменён один параметр (профиль назначен по измеренной категории условий движения), отклонение составляет −8,6…+14,9 % при среднем модуле 5,4 % и +0,4 % со знаком. В допуске ±20 % десять клеток из десяти, и то же при собственном критерии источника ±17 % в каждой из трёх расстановок. Размах по трём расстановкам равен 0,0…3,2 % среднего времени, от четырёх до тридцати раз меньше расхождения с экспериментом при базовой конфигурации, поэтому разброс начальных чисел расстановки на вывод не влияет. Числа по каждой клетке приведены в приложении Г10.

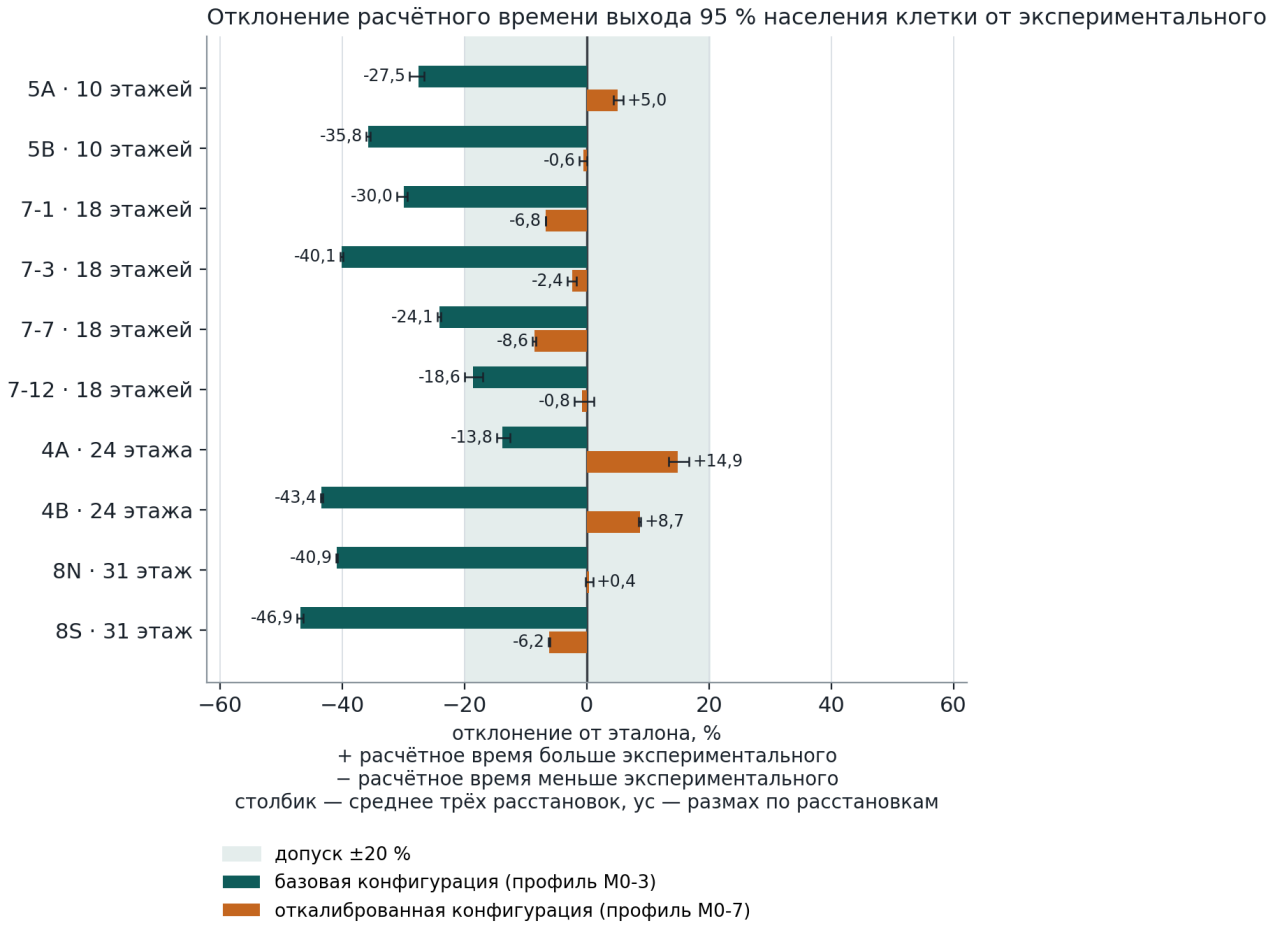


Рисунок 39. Отклонение времени выхода 95 % населения от замера по десяти лестничным клеткам четырёх зданий при двух конфигурациях расчёта, базовой с профилем M0-3 и откалиброванной с M0-7. Среднее трёх расстановок с отметкой размаха, полоса допуска ±20 %

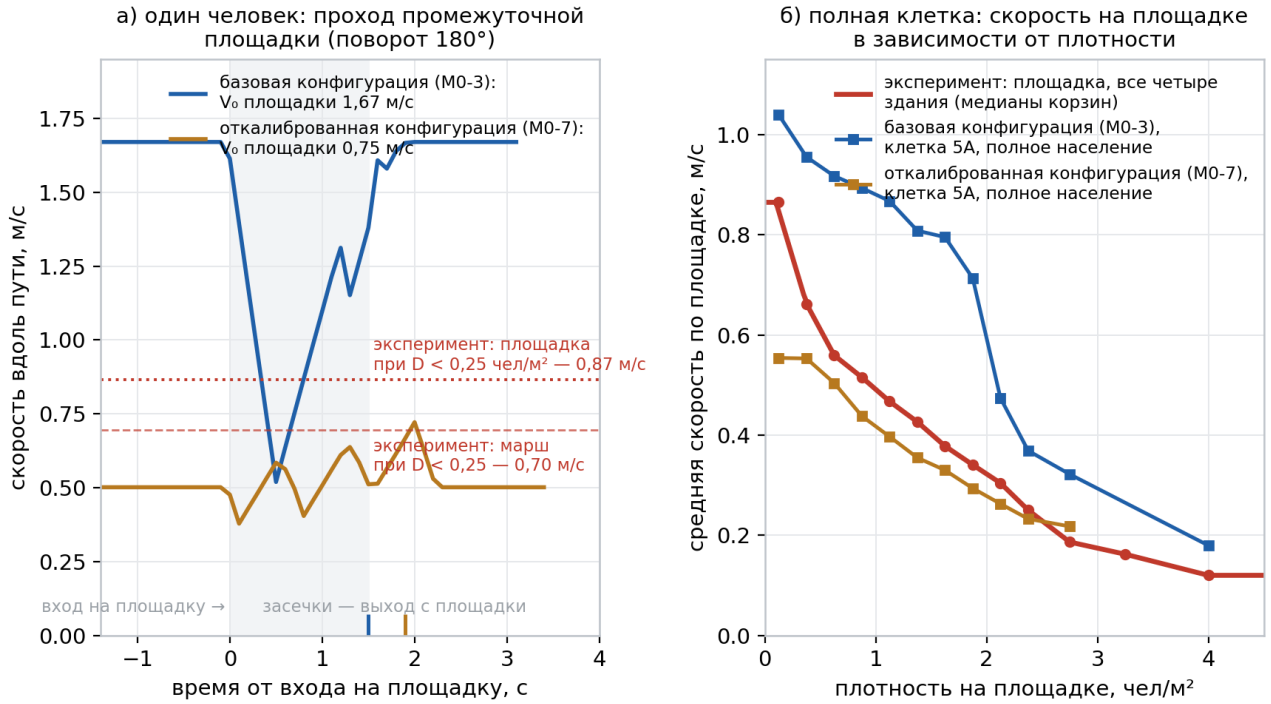


Рисунок 40. Промежуточная площадка. На панели (а) при шаге 0,1 с показана скорость одного агента вдоль пути при повороте на 180°. На панели (б) – её средний уровень по площадке в зависимости от плотности: экспериментальные данные, базовая и откалиброванная конфигурации расчёта

Расхождение относится к маршам, а не к поворотам. На площадке расчётная скорость при базовой конфигурации составляет 1,01…1,04 м/с против измеренных 0,87 м/с при малой плотности, тогда как на марше различие достигает 2,4 раза. Согласование при откалиброванной конфигурации обеспечивает не уровень скорости свободного движения профиля M0-7, а форма его кривой «скорость–плотность». Коэффициент a и порог D_0 у M0-7 отличаются от значений профиля M0-3, и одной заменой скорости в нём согласование с учениями не достигается (приложение Г10).

Экспериментальных данных по движению по пандусу в документе нет. Расчётом подтверждено, что перелом кривых пандуса приходится на уклон 1:8, на границу, с которой методика причисляет наклонный путь к горизонтальным. Ближайшая постановка с пандусом – рампа 1,4 м уклоном 1:6 в тесте ISO 7 (раздел 2.4).

2.7.5 ВЫВОД

Наклонные пути реализованы верно (тесты ISO 3, 10 и 12, табличные скорости марша всех профилей в допуске), но при базовой конфигурации расчётное время выхода из лестничных клеток NIST меньше измеренного, поскольку профиль офисных зданий задан для повышенной активности, а учения шли при комфортном движении, и результат служит оценкой снизу. При профиле по измеренной категории условий движения в допуске все клетки, а по пандусам экспериментального подтверждения нет.

2.8 Выбор выхода и маршрута

2.8.1 ЯВЛЕНИЕ

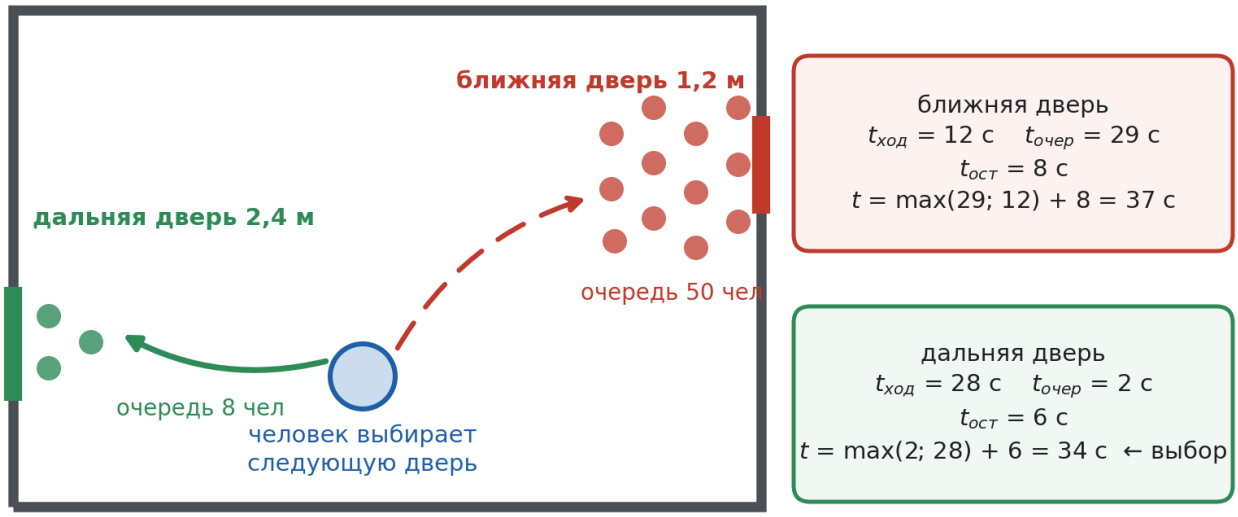
При нескольких выходах человек выбирает тот, до которого, по его оценке, дойдёт за меньшее время, учитывая расстояние и очередь у двери. Если выход закрыт или перед ним скопление, люди перенаправляются к другому. Методика правило выбора выхода не задаёт: расчётная схема составляется

с учётом всех эвакуационных путей [1, прил. № 5], а выход с наибольшим потоком блокируется очагом пожара. От распределения людей по выходам зависит загрузка каждого из них, а с ней – расчётное время эвакуации. Проверяется, что агент выбирает выход по наименьшему ожидаемому времени, что перестроение при закрытии или загруженности выхода происходит, и что доля людей, направившихся к каждому выходу, отвечает критериям тестов ISO 20414 и IMO.

2.8.2 РЕАЛИЗАЦИЯ В МОДЕЛИ

Расчётная схема разбита на участки: помещения, коридоры, марши и площадки, соединённые дверями и створами. Перед первым шагом программа один раз обходит эту схему. Для каждой двери вычисляется ожидаемое время от неё до цели: длины отрезков пути, делённые на скорость свободного движения профиля с учётом уклона участков. Полученный набор, дерево времён, позволяет агенту, стоящему в дальнем помещении, сравнивать выходы, которых он не видит. Цель агента задаёт поведение, назначенное расчётчиком: выход любой или названный, помещение или точка. Когда назначен конкретный выход, сравнение не выполняется и агент идёт к назначенной двери.

Внутри участка агент сравнивает двери-кандидаты по ожидаемому времени $t = \max(b_п \cdot f_{очер} \cdot t_{очер};\ k_{пути} \cdot f_{ход} \cdot t_{ход}) + k_{пути} \cdot f_{ост} \cdot t_{ост}$. Здесь $t_{ход}$ – время дойти до двери. Время $t_{очер}$ – ожидание перед створом, равное числу стоящих впереди, делённому на наблюдаемый поток этого створа, а $t_{ост}$ отсчитывается от двери до цели по дереву времён. Наибольшее из времени хода и ожидания берётся потому, что идущий к двери человек уже стоит в её очереди, и эти два срока не складываются. Множитель $b_п$ учитывает предпочтение ранее выбранной двери: её ожидание оценивается на 35 % меньше, и агент не колеблется между двумя близкими дверями. Множитель $k_{пути} = 2^{s/35\ м}$ повышает оценку тем сильнее, чем больший путь s агент уже прошёл в этом участке, и тем ограничивает возвраты. Значения коэффициентов f приведены в приложении Е. Поскольку в оценку входит время $t_{ост}$, а в него входят очереди дверей, лежащих дальше на маршруте, агенты распределяются между выходами по времени, а не по расстоянию.



$$t = \max(b \cdot f_{очер} \cdot t_{очер},\ k_{пути} \cdot f_{ход} \cdot t_{ход}) + k_{пути} \cdot f_{ост} \cdot t_{ост}$$

$t_{ход}$ — дойти до двери, $t_{очер}$ — ожидание в очереди, $t_{ост}$ — от двери до цели по дереву времён. Люди делятся между выходами по времени, а не по расстоянию.

Рисунок 41. Слагаемые оценки двери: ближний створ с длинной очередью и дальний с короткой. Для каждого показаны время хода, ожидание и остаток до цели по дереву времён

Оценка повторяется каждые 0,1 с, и с тем же шагом пересчитываются наблюдаемый поток каждого створа и число стоящих в очередях. Агент, подошедший к перегруженной двери, меняет её на другую, если суммарная оценка второй оказалась меньше. Пока створ не пропустил ни одного человека, наблюдаемый поток принимается не ниже 0,1 номинального, иначе оценка ожидания была бы неограниченной.

Маршрут внутри участка строится как кратчайший путь по треугольникам расчётной сетки и затем выпрямляется через допустимые части рёбер. Если отрезок выпрямленной ломаной проходит между стенами на расстоянии меньше ширины плеч агента, эти рёбра запрещаются и маршрут строится заново. Путь не прокладывается там, где агент по ширине не помещается.

Дверь закрывается и открывается по времени, заданному в сценарии. Дверь, закрытая до конца расчёта, исключается из дерева времён, и агенты к ней не идут. Дверь, закрытая на срок, остаётся в дереве, а время до её открытия входит в оценку как ожидание. Момент закрытия задаётся не ранее 0,1 с: нулевая секунда занята построением расчётной сетки, и при заданном времени повторного открытия расчёт с ним неверен.

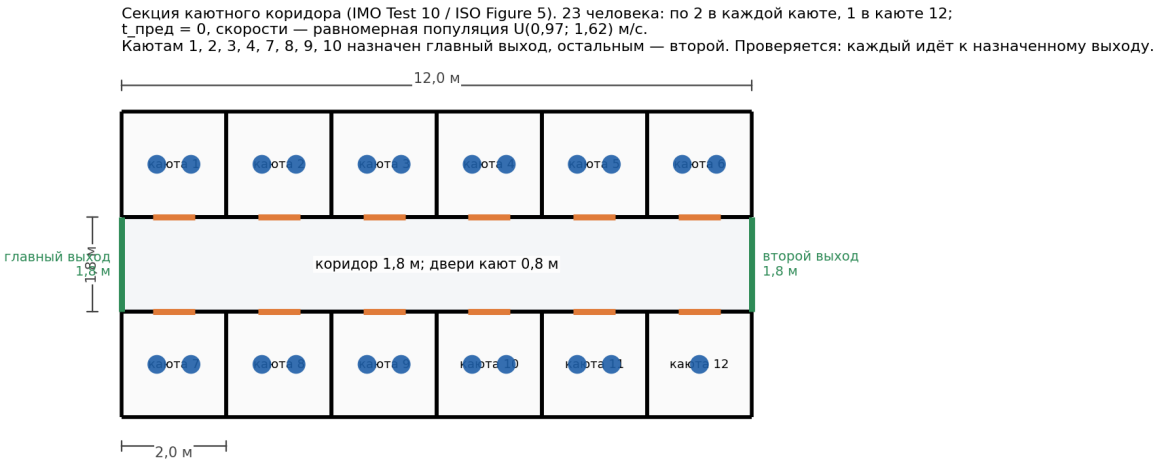
2.8.3 ВЕРИФИКАЦИЯ

Правило выбора выхода сравнивается с критериями протокола ISO 20414 [5] и циркуляра IMO MSC.1/Circ.1533 [6]. Разобраны четыре постановки. Критерии трёх из них качественные (исполнение назначения, неиспользование закрытого выхода, совпадение маршрута с алгоритмом), поэтому допуск документа ±10 % применим к одному тесту IMO 9. Параметры движения во всех четырёх тестах задаёт источник теста, остальные значения берутся из базовой конфигурации расчёта. Режим УАМ на эти постановки не влияет, и числа тестов на расчёт пожарного риска не переносятся (приложения Г1 и Г5).

Таблица 21. Тесты ISO 20414 и циркуляра IMO, проверяющие выбор выхода и маршрута

Тест	Постановка	Критерий источника	Результат при базовой конфигурации
ISO 8. Назначение выхода	каютный коридор 1,8 × 12 м, двенадцать кают 2 × 2 м, два выхода 1,8 м, 23 человека	люди идут к назначенным выходам	к назначенному выходу ушли 23 человека из 23; при цели «любой выход» на той же расстановке – 19 из 23
ISO 9. Динамическая доступность выхода	комната 10 × 15 м, два выхода по 1,0 м у одного торца, выход 1 закрывается на первой секунде	закрытый выход не используется	доля использования выхода 1 – 0 %; время выхода 14,88 с против 13,80 с при открытом выходе 1
ISO 17. Выбор маршрута по геометрии	два этажа, верхний коридор со смещением 2 / 4 / 6 м, пара маршей 45° и коридор нижнего этажа	выбранный путь соответствует алгоритму выбора маршрута	совпадение в трёх вариантах геометрии из трёх: при смещении 2 м выбран верхний путь, при 4 и 6 м – нижний (29,50 и 33,50 против 25,99 м)
IMO 9. Рассредоточение толпы из зала	зал 30 × 20 м, 1000 человек, четыре двери 1,0 м и вдвое меньшее их число	примерное удвоение времени опорожнения зала	отношение времён 2,00 и 1,99 против 2,00 по двум расстановкам

ISO 20414, Test 8. Назначение маршрута к выходу — постановка источника



Источник постановки: ISO 20414:2020 «Fire safety engineering — Verification and validation protocol for building fire evacuation models», раздел 5, Test 8 (Exit route allocation); геометрия — по Annex B и конспекту верификация/конспекты/02-iso-20414.md.

Рисунок 42. Постановка теста ISO 8 «Назначение выхода»: каютный коридор 1,8 × 12 м, двенадцать кают, 23 человека и две двери по 1,8 м в ширину. Каютам 1–4 и 7–10 назначен главный выход, остальным второй (по [5])

Тест IMO 9 проверяет отклик времени эвакуации на изменение числа выходов и не включён ни в стандарт ISO 20414, ни в записку NIST TN 1822 [41]. Постановка [6, прил. 3, п. 15]: зал 30 × 20 м, четыре двери шириной 1,0 м, скорость свободного движения распределена равномерно на 0,97…1,62 м/с и 1000 человек в центральной зоне 26 × 16 м при 2,4 чел/м². На втором шаге открыта центрально-симметричная пара дверей. Время выхода последнего человека составляет 214,6 и 214,9 с при четырёх дверях и 429,7 и 427,9 с при двух по двум расстановкам, отношение равно 2,00 и 1,99 против ожидаемых источником 2,00: критерий циркуляра выполнен. Отношение близко к двум, поскольку время подхода первых агентов к створу входит в оба шага и из отношения не сокращается. Предел потока

проёма 1,42 чел/(с·м) [1, табл. П2.8] уменьшает поток каждого створа одинаково при четырёх и при двух дверях и на отношение не влияет. Абсолютного времени опорожнения источник не задаёт. Отклонение считается от удвоенного расчётного времени первого шага той же расстановки, от 429,2 и 429,9 с, и составляет +0,5 и −2,0 с, или +0,1 и −0,5 %. В допуск ±10 % входят обе расстановки (приложение Г5).



Рисунок 43. Тест IMO 9 при базовой конфигурации расчёта. Слева время выхода последнего человека, с, при четырёх и при двух дверях шириной 1,0 м по двум расстановкам. Справа – отношение времён двух шагов против ожидаемого источником значения 2,00

2.8.4 ВАЛИДАЦИЯ

Натурного или лабораторного ряда, в котором измерено распределение людей между выходами или перестроение маршрута при закрытии выхода, среди рассмотренных источников нет. Сравнение с экспериментом в этом разделе не проводится, и откалиброванная конфигурация расчёта не строится. Подтверждение процесса ограничено критериями протокола ISO 20414 и циркуляра IMO. Ближайшие к явлению данные дают сами тесты: след расчёта теста ISO 9 показывает перестроение при закрытии выхода.

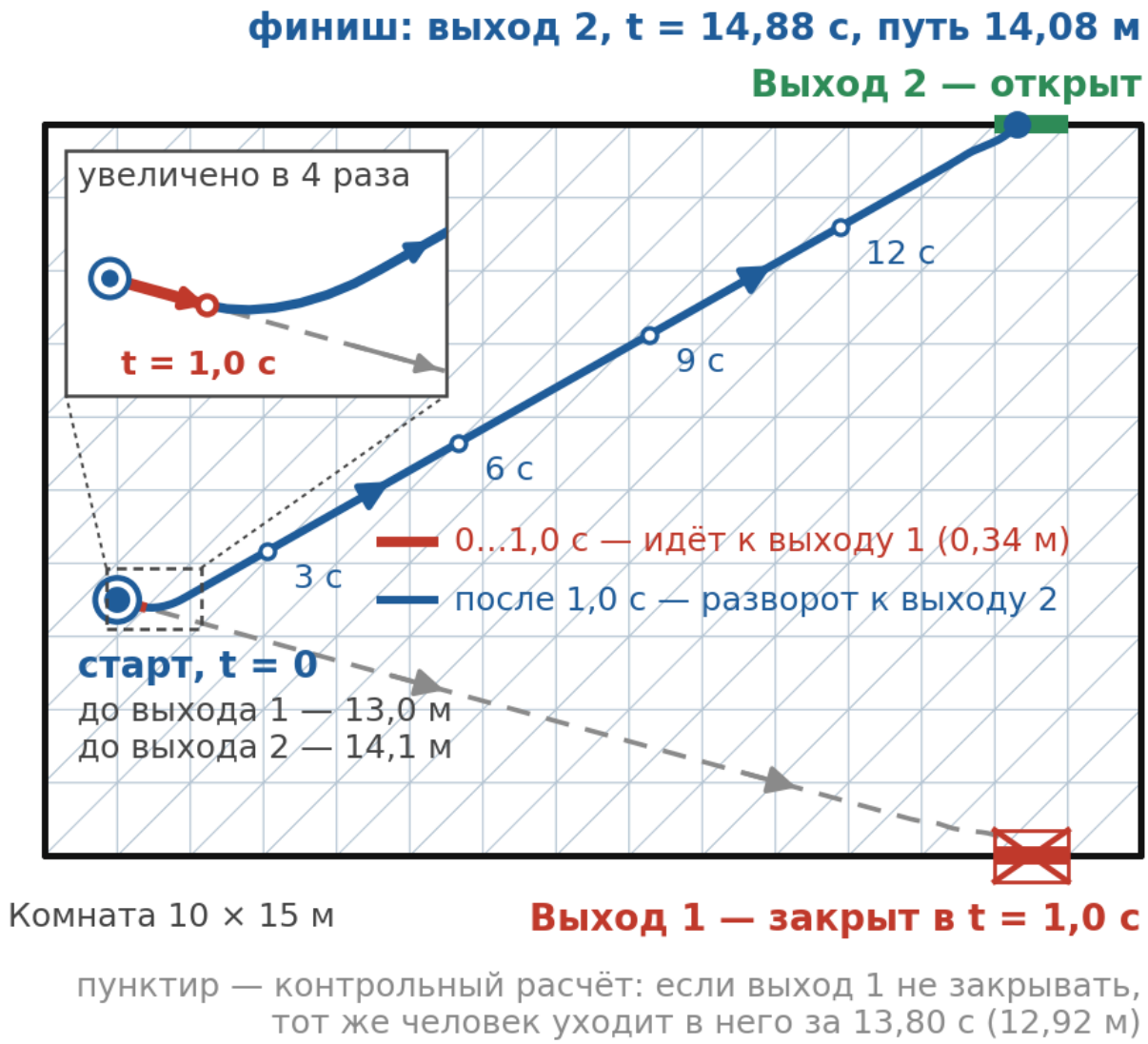


Рисунок 44. Ближайшие к явлению данные: след теста ISO 9 при базовой конфигурации расчёта. Выход 1 закрыт на первой секунде. Человек, стоявший к нему ближе, успевает пройти к нему 0,34 м, разворачивается и уходит к выходу 2 у противоположной стены за 14,88 с

2.8.5 ВЫВОД

Все четыре свойства выбора выхода и маршрута подтверждены тестами ISO 8, 9, 17 и IMO 9, где удвоение времени при вдвое меньшем числе дверей воспроизведено в допуске. Экспериментального подтверждения распределения агентов между выходами нет, подмоделей социального влияния и привязанности к знакомому выходу в ядре нет.

2.9 Движение маломобильных людей

2.9.1 ЯВЛЕНИЕ

Люди с ограниченной подвижностью (пожилые, с нарушениями опорно-двигательного аппарата, слепые, на кресле-коляске) передвигаются с меньшей скоростью и занимают большую площадь. С ростом плотности их скорость снижается иначе, чем у здоровых взрослых, а кресло-коляска и носилки требуют широкого проёма. Методика выделяет группы мобильности M1…M4 с собственными скоростями, коэффициентами кривой «скорость–плотность» и площадями проекции [1, табл. П2.5, П2.7], а для немобильных задаёт скорости переноски и число рейсов персонала [1, табл. П2.9, П2.10]. Доля

маломобильных назначается по классу здания [1, табл. П2.4] и в домах-интернатах, больницах и поликлиниках определяет время эвакуации. Проверяется, что программа воспроизводит табличные значения групп М1…М4, движение кресла-коляски через проём и сопровождение немобильного человека. Согласование с экспериментом ведётся по натурным рядам скоростей и потоков у маломобильных участников.

2.9.2 РЕАЛИЗАЦИЯ В МОДЕЛИ

Каждой группе отвечает профиль библиотеки: набор из скорости свободного движения, коэффициента a и порога плотности D_0 кривой «скорость–плотность» по трём видам пути, площади и формы проекции. Значения профилей М1…М4 и немобильных взяты из табл. П2.7 и П2.9 [1], площадь проекции – из п. 10 приложения № 2. Никаких иных механизмов для маломобильных людей в модели нет: они движутся по тем же правилам, что и группа М0, и отличаются только значениями профиля и размером проекции.

Проекция групп М1…М3 задана равновеликим кругом, как и у здоровых взрослых (раздел 2.2). Для группы М4 и средств транспортировки проекция задаётся многоугольником: у кресла-коляски это прямоугольник 0,8 × 1,2 м по табл. П2.5 [1], у транспортируемого на носилках – 0,50 × 2,10 м (f = 1,05 м²). Многоугольная проекция имеет направление, поворачивается с ограниченной скоростью, касается стен действительным контуром и не разворачивается там, где контур пересёк бы стену.

Круг не воспроизводит проходимость кресла-коляски ни при каком диаметре. Дверь 0,9 м, свободную для габарита 0,8 м, круг равновеликой площади Ø 1,11 м не проходит. Для поворота на 90° кресло-коляске нужен проход не менее 0,99 м, чего круг по ширине Ø 0,80 м не учитывает. Протяжённые габариты ограничивают друг друга: три кресла-коляски, подошедшие к выходу одним рядом, образуют взаимную блокировку, а при сдвиге начальных точек на 0,25 м её нет.

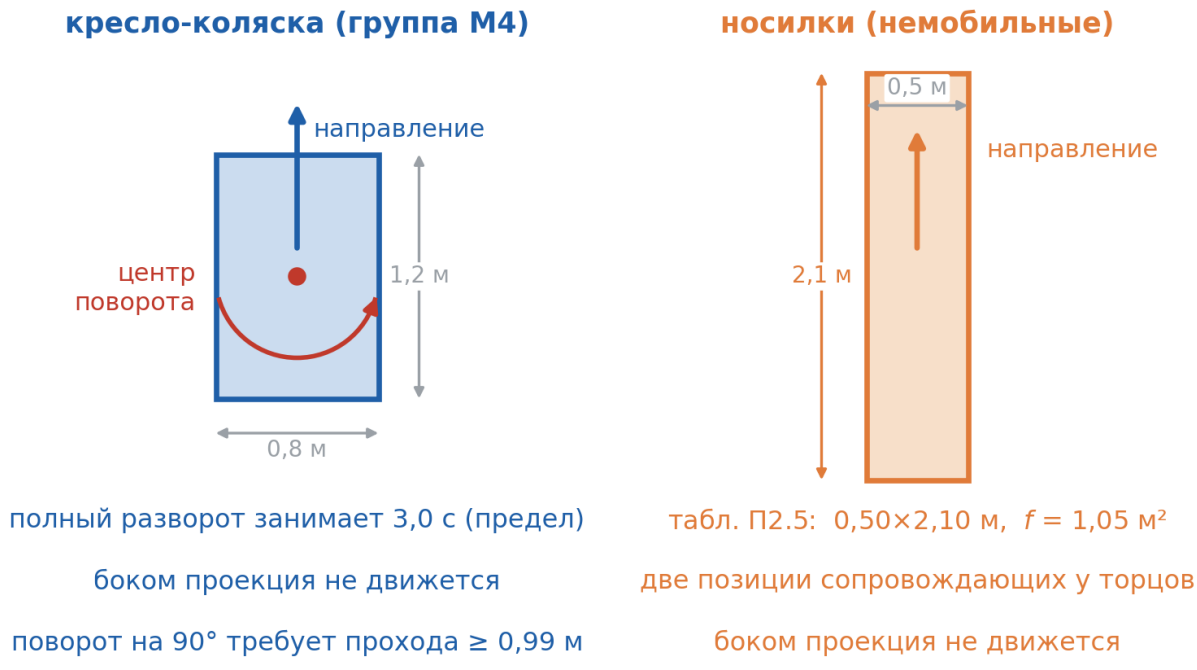


Рисунок 45. Многоугольные проекции маломобильных: кресло-коляска 0,8 × 1,2 м с центром поворота и носилки 0,5 × 2,1 м с двумя позициями сопровождающих. Размеры по табл. П2.5 методики

Немобильный агент остаётся на месте, пока к нему не прикрепится сопровождающий. Сопровождающие подходят к местам прикрепления на контуре средства транспортировки, после чего группа движется как одно целое со скоростью переноски табл. П2.9. Задержки на укладывание и перекладывание и рейс персонала за следующим человеком по п. 12 приложения № 2 задаются сценарием, а не вычисляются ядром.

Группу мобильности задают класс функциональной пожарной опасности и контингент [1, табл. П2.3, П2.4]. Такое назначение входит в базовую конфигурацию расчёта, и значения параметров остаются табличными. Там, где состав людей известен точнее, чем следует из класса здания (дома-интернаты, больницы, поликлиники), группа назначается по этому составу [13, с. 57].

2.9.3 ВЕРИФИКАЦИЯ

Профили и проекции сравниваются с табл. П2.5, П2.7 и П2.9 методики и с п. 10 приложения № 2 при базовой конфигурации расчёта, допуск документа ±10 %. Числа по каждому профилю приведены в приложениях Г2 и Г12. Скорость свободного движения профиля проверяется строже: она хранится округлённой до сотых метра в секунду, и собственный допуск этой сверки составляет ±2 %. Отклонение скорости от таблицы по модулю не превышает 1,26 % у всех профилей библиотеки по трём видам пути: в допуске и ±2 %, и ±10 %.

Таблица П2.5

Площадь горизонтальной проекции людей с ограниченной мобильностью, м²/чел.

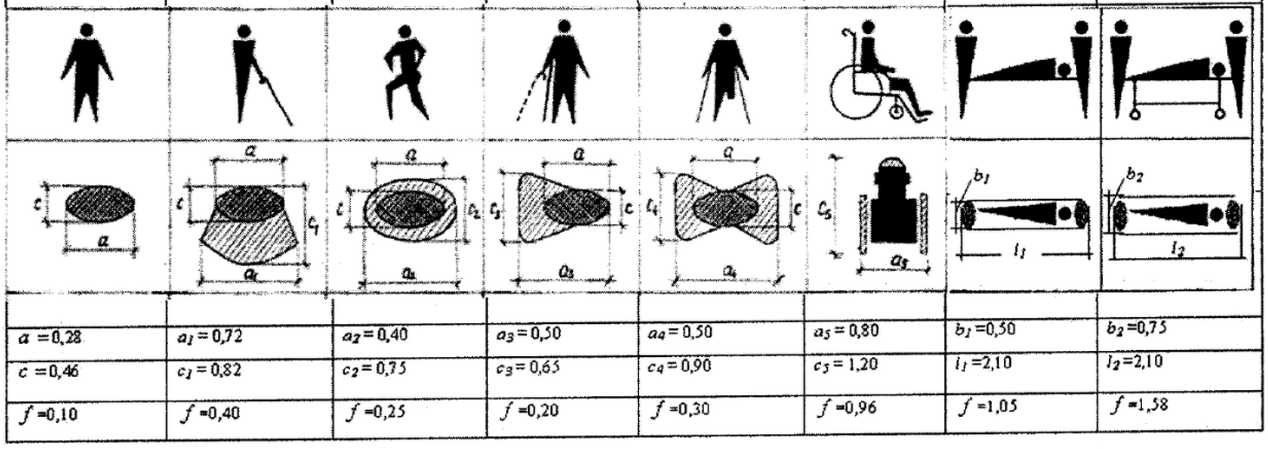
Здоровые люди, слабослышащие, с ограничением умственной деятельности	Слепые	С поражением опорно-двигательного аппарата					
		передвигающиеся без дополнительных опор	передвигающиеся с одной дополнительной опорой	передвигающиеся с двумя дополнительными опорами	передвигающиеся на креслах-колясках	транспортируемые на носилках	транспортируемые на каталках
1	2	3	4	5	6	7	8
							
$a = 0{,}28$	$a_1 = 0{,}72$	$a_2 = 0{,}40$	$a_3 = 0{,}50$	$a_4 = 0{,}50$	$a_5 = 0{,}80$	$b_1 = 0{,}50$	$b_2 = 0{,}75$
$c = 0{,}46$	$c_1 = 0{,}82$	$c_2 = 0{,}75$	$c_3 = 0{,}65$	$c_4 = 0{,}90$	$c_5 = 1{,}20$	$l_1 = 2{,}10$	$l_2 = 2{,}10$
$f = 0{,}10$	$f = 0{,}40$	$f = 0{,}25$	$f = 0{,}20$	$f = 0{,}30$	$f = 0{,}96$	$f = 1{,}05$	$f = 1{,}58$

Рисунок 46. Площадь горизонтальной проекции маломобильных групп по табл. П2.5 методики [1]: силуэты, эллипсы с осями a и c и значения f, с которыми сверены профили библиотеки. Площадь меняется от 0,10 м² у здоровых взрослых до 0,96 м² у кресла-коляски, 1,05 м² у носилок и 1,58 м² у каталки

Таблица 22. Сверка профилей и геометрии проекций маломобильных групп с таблицами методики

Проверка	Требование методики	Результат при базовой конфигурации
Скорость свободного движения профилей табл. П2.7 по трём видам пути	табличное значение [1, табл. П2.7]	отклонение по модулю не более 1,26 %; наибольшее по горизонтали – +0,80 % («М2 немощные»)
Площадь проекции, девять значений п. 10 приложения № 2: 0,03…0,96 м²	значение пункта методики	все девять воспроизведены диаметрами профилей с отклонением не более 0,04 %
Проекция кресла-коляски, табл. П2.5	0,80 × 1,20 м, f = 0,96 м²	многоугольник 1,2 × 0,8 м, f = 0,96 м² – совпадение точное
Проходимость кресла-коляски (проходной диаметр 0,456 м)	проход проёма, равного габариту	многоугольная проекция проходит 0,80 м и шире и не проходит 0,30…0,75 м; круговая Ø 1,11 м проём 0,90 м не проходит
Проходимость проекции слепых (Ø 0,714 м, проходной диаметр 0,28 м)	проход узкого места по проходному диаметру	проходит 0,30 м и шире

Обгон маломобильного человека в потоке проверен тестом ISO 7: время выхода зоны 1 со встроенным агентом группы М3 составляет 34,0 с против 29,2 с без него, или +16,4 %. Качественный критерий стандарта ISO 20414 выполнен (раздел 2.4).

2.9.4 ВАЛИДАЦИЯ

Источник данных	натурные наблюдения главы 3 монографии [11] – люди с поражением опорно-двигательного аппарата (далее – ОДА), слепые, глухие, участники на креслах-колясках; престарелые в домах-интернатах и больницах [16;13; 17]; независимый ряд по поликлинике [21]; восемь пар «профиль – натурная группа»
Критерий оценки	валидация: математические ожидания скорости свободного движения, ряды удельного потока через проём 1,2 м, кривая «скорость–плотность» престарелых и времена преодоления проёма креслом-коляской с 95 % доверительными интервалами; допуск ±20 %
Расчётная модель	три постановки, во всех проём b = 1,2 м: комната 8 × 5 м с одним профилем на расчёт при 0,75…1,50 чел/м²; коридор 1,8 × 40 м с профилем М4 при трёх плотностях; коридор 20 м со встроенным замером кривой; расстановка равномерная шестиугольная, 22 расчёта с проёмом и 22 замера кривой
Конфигурации расчёта	базовая: профиль группы мобильности участников опыта (он же профиль контингента по [1, табл. П2.2, П2.7]; для домов-интернатов, больниц и поликлиник «М2 немощные» и «М3 одна опора» по [13, с. 57]; кресло-коляска – М4), предел потока проёма 1,42 чел/(с·м) · откалиброванная: не требуется – параметры профиля и есть значения источника

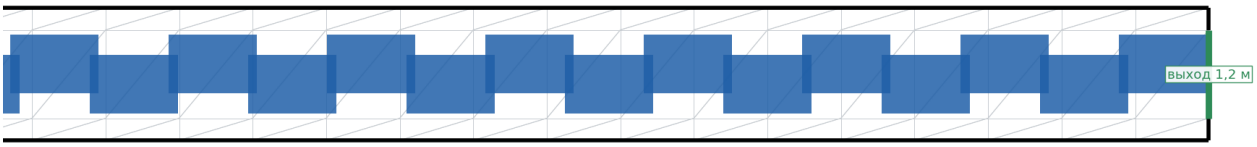


а *б*

Рис. 3.20. Очередность движения через дверной проем:
а – при достижении дверного проема; *б* – при преодолении дверного проема;
1–3 – номер эвакуирующегося

Рисунок 47. Очередность прохождения дверного проёма участниками на креслах-колясках в опыте (по [11], рис. 3.20)

Постановка «кресло-коляска»: коридор 1,8 × 40 м, профиль M4, проём 1,2 м в торце — участок 24…40 м



Постановка ПЗ; показан участок коридора перед проёмом. Проекция кресла-коляски — прямоугольник 1,2 × 0,8 м по п. 10 приложения № 2 методики № 1140.

Рисунок 48. План расчётной модели для группы M4: коридор 1,8 × 40 м с проёмом 1,2 м в торце, участники на креслах-колясках расставлены равномерно

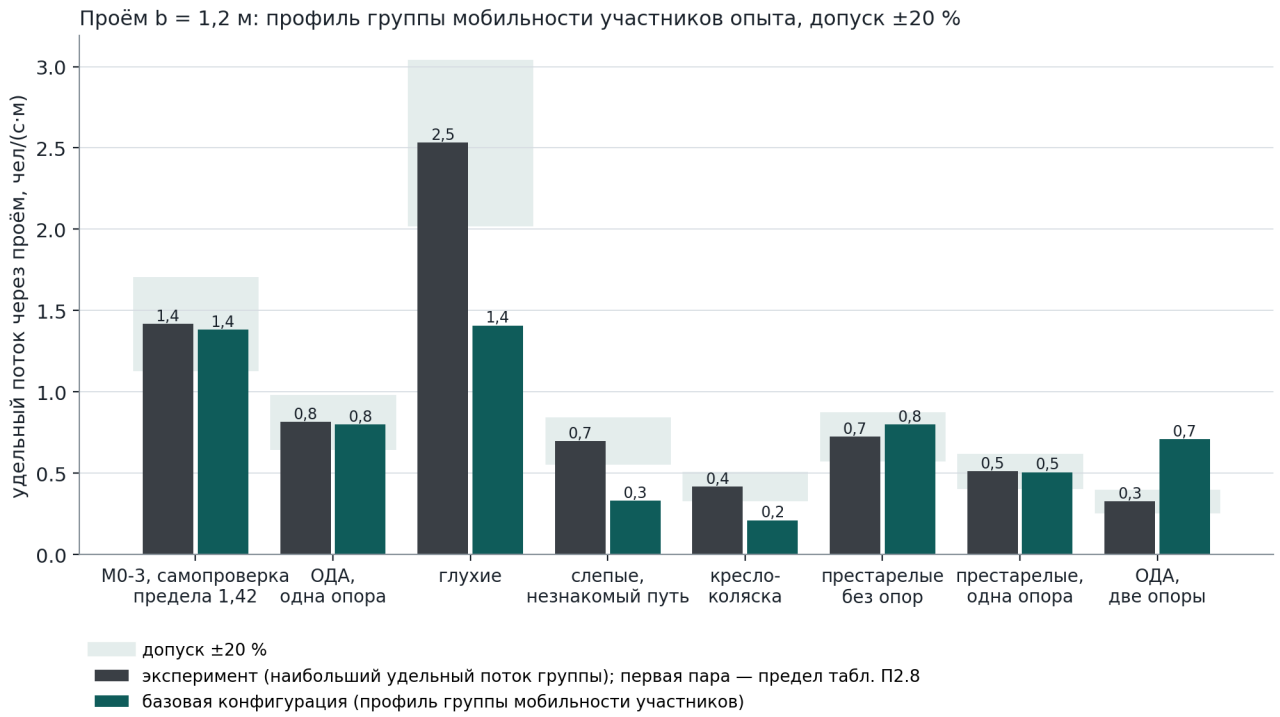


Рисунок 49. Наибольший удельный поток через проём 1,2 м, измеренный в опыте и расчётный, по восьми парам «профиль – натурная группа». Базовая конфигурация расчёта, предел потока проёма 1,42 чел/(с·м)

По удельному потоку через проём 1,2 м в допуске ±20 % четыре пары из восьми (−2,6…+10,2 %). У трёх пар расчётный поток меньше измеренного на 44,4…52,6 % (глухие, слепые на незнакомом пути и участники на креслах-колясках), и расчётное время прохода проёма соответственно больше. У одной пары расчётный поток больше измеренного на +116,8 %: это ОДА с двумя дополнительными опорами, которым в методике отвечает та же строка «М3», что и людям с одной опорой. Результат определяют скорость и площадь проекции профиля, а не предел потока проёма: измеренные потоки всех групп, кроме глухих, лежат ниже 1,42 чел/(с·м). Приложение Г12.

По скорости свободного движения в допуске ±20 % четыре пары из шести (−4,1…+5,2 %). У ОДА с двумя опорами и у престарелых в смешанном потоке расчётная скорость больше измеренного математического ожидания на +24,5 и +21,1 %, и расчётное время движения по горизонтали соответственно меньше. Кривая «скорость–плотность» престарелых отличается от измеренной на +2,2 и −1,6 % при 0,89 и 1,06 чел/м² и на +21,9 % при 2,01 чел/м²: в допуске две точки из трёх.

По времени преодоления проёма 1,2 м креслом-коляской в допуске ±20 % одна плотность из трёх: при 0,48 м²/м² расчёт меньше измеренного на −0,07 с (−2,4 %). При 0,24 м²/м² расчётное время эвакуации больше измеренного на +0,86 с, или +41,1 %, при 0,72 м²/м² – меньше на −2,29 с, или −44,4 %. В доверительный интервал источника попадает та же одна плотность из трёх. Рост времени прохода с плотностью не воспроизводится: через створ 1,2 м агенты на креслах-колясках проходят по одному, и очередь перед ним на это время не влияет.

2.9.5 ВЫВОД

Профили групп М1…М4 и немобильных воспроизводят таблицы методики в допуске верификации, а с натурными рядами при базовой конфигурации в допуск входит половина пар по потоку через проём и большая часть по скорости: у глухих, слепых и кресел-колясок расчётный поток меньше измеренного (оценка сверху), у людей с двумя опорами больше. Независимый ряд один (поликлиника), профили «М2

немощные» и «М3 одна опора» применимы при умеренной плотности расстановки, а сопровождение реализовано только для немобильного агента.

2.10 Эвакуация по совокупности участков

2.10.1 ЯВЛЕНИЕ

Путь эвакуации складывается из помещений, коридоров, дверей, лестниц и выходов. Время эвакуации из здания определяется их совместной работой. Скопление у одной двери задерживает подход к следующей, потоки с этажей вливаются в лестницу, а последний человек выходит тогда, когда самое узкое место пропустит всех. Расчётным временем эвакуации методика считает время выхода последнего человека [1, прил. № 7, п. 1] и требует учитывать все участки пути расчётной схемы [1, прил. № 5]. Механизмы, проверенные в предыдущих разделах по отдельности, здесь работают одновременно, и их взаимное влияние может дать отклонение, которого нет ни у одного из них. Проверяется расчёт на комплексных схемах: примеры гидравлической модели SFPE с аналитическим решением, лестничные клетки NIST, а также повторяемость результата при смене начальных чисел расстановки.

2.10.2 РЕАЛИЗАЦИЯ В МОДЕЛИ

Модельное время идёт шагами $\Delta t = 0{,}025$ с, и внутри шага операции выполняются в неизменном порядке. Сначала отрабатывают сценарные события: открытие и закрытие дверей, смена цели. Затем каждый агент пересматривает цель и маршрут, а положения и скорости всех агентов снимаются один раз на шаг. Дальше идут перемещение каждого агента с поиском первого касания стены или соседа, события дверей и синхронизация групп сопровождения, выпуск агентов из очередей перед створами и запись результатов. Ключевая часть порядка – единый снимок: все агенты шага видят одно и то же положение соседей, поэтому результат не зависит от очерёдности их обработки.

Расчёт заканчивается, когда все агенты завершили поведение, либо по достижении предела модельного времени (по умолчанию 3600 с). Расчётное время эвакуации $t_р$ определяет агент, завершивший поведение последним. Из наибольшего момента завершения вычитается время начала эвакуации. Условие $t_р + t_{нэ} \leqslant 0{,}8 \cdot t_{бл}$, время существования скоплений $t_{ск}$ и вероятность эвакуации $Р_э$ по п. 17 методики [1] вычисляются вне ядра, по его выдаче.

Связь участков между собой создаёт дерево времён: в оценку двери-кандидата входят очереди дверей, лежащих дальше на маршруте. Скопление у выходного створа влияет поэтому на распределение людей ещё в помещениях этажа (раздел 2.8).

Расчёт детерминирован: результат не зависит ни от числа потоков процессора, ни от порядка строк во входном файле. Повторение той же модели даёт те же значения. Случайные величины задаются начальными числами генератора, записанными во входном файле (приложение Ж): это назначенные по распределениям скорости, времена начала эвакуации и расстановка людей.

Результат на комплексной схеме зависит от пяти правил построения модели.

1. Объект «дверь» задаётся там, где в стене есть проём, но не на границах участков одного коридора и не на перекрёстках (раздел 2.6).
2. Если граница участка оформлена створом, предел потока через него задаётся по виду пути (раздел 2.5).
3. Выход из расчётной области оформляется дверью с нормативным пределом потока проёма (раздел 2.6).
4. Момент сценарного события закрытия двери назначается по правилу раздела 2.8.

5. Начальные числа расстановки агентов в повторных расчётах одной модели задаются разнесёнными (раздел 2.2).

2.10.3 ВЕРИФИКАЦИЯ

Аналитическим решением для схемы из нескольких участков служат два разобранных примера гидравлической модели руководства SFPE [38] – схема Нельсона и Маурера [36] в изложении [37].

Источник данных	два полностью разобранных примера расчёта по гидравлической модели [38]: пример 1 – 300 человек, помещение 61,0 × 9,14 м, две двери 0,813 м, два марша и приёмное помещение; пример 2 – 1000 человек, пять этажей, две лестницы с промежуточными площадками
Критерий оценки	верификация: опубликованное аналитическое решение – 245,2 с для примера 1 и 608,4 с для примера 2; допуск ±10 %
Расчётная модель	постановки собраны по словесному описанию источника; восемь расчётов – две постановки × два набора параметров движения × две конфигурации расчёта; набор гидравлической модели – V_0 = 1,19 м/с и её кривая «скорость–плотность», набор методики – профиль M0-3, V_0 = 1,67 м/с и кривые методики
Конфигурации расчёта	базовая: режим УАМ выключен, предел потока проёма задан значением – 1,42 чел/(с·м) при наборе параметров методики [1, табл. П2.8] и 1,32 чел/(с·м) при наборе гидравлической модели (значение источника) · откалиброванная: режим УАМ, поскольку аналитическое решение получено по упрощённой аналитической модели

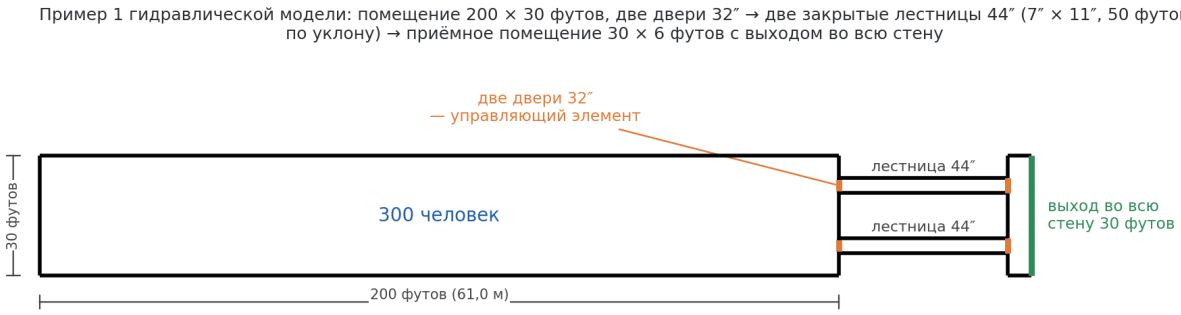


Рисунок 50. Постановка примера 1: 300 человек в помещении 61,0 × 9,14 м, две двери 0,813 м на лестницы, приёмное помещение с выходом во всю стену (по [38])

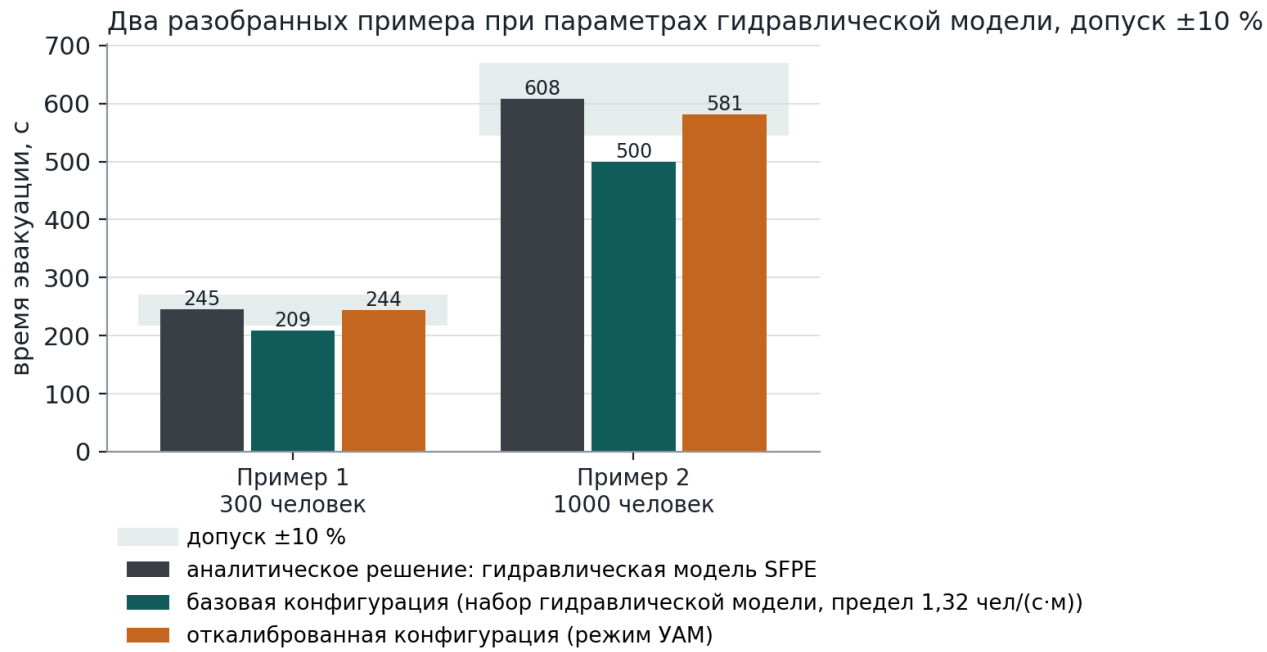


Рисунок 51. Два примера гидравлической модели при параметрах источника: опубликованное аналитическое решение и две конфигурации расчёта. Базовая имеет предел потока проёма 1,32 чел/(с·м) этого набора, откалиброванная ведётся в режиме УАМ. По оси ординат время эвакуации, с

При базовой конфигурации расчётное время эвакуации меньше аналитического решения во всех четырёх расчётах. Отклонение составляет −17,8 и −14,7 %, или −108,4 и −36,0 с, при параметрах гидравлической модели и −38,5 и −36,4 %, или −234,5 и −89,2 с, при наборе методики. В допуске ±10 % ноль расчётов из четырёх. В этих постановках расчёт даёт оценку времени эвакуации снизу. При откалиброванной конфигурации отклонение составляет −6,3…−0,4 %, и в допуске четыре расчёта из четырёх.

Причина различия – ширина управляющего элемента. В аналитическом решении поток через дверь на лестницу шириной 0,813 м считается по эффективной ширине 0,813 − 2 · 0,15 = 0,508 м, что при удельном потоке 1,32 чел/(с·м) даёт 0,671 чел/с через створ. Постоянный предел 1,42 чел/(с·м) выше такого значения, поэтому на этом створе он не действует: фактически проходит 0,831…1,121 чел/с при базовой конфигурации. В режиме УАМ предел вычисляется по геометрии того же створа и равен 0,752 чел/с при фактическом выпуске 0,697…0,723 чел/с (приложение Г13). Тест ISO 10 «скопление перед лестницей» и постановка IMO 9 разобраны в разделах 2.7 и «Выбор выхода и маршрута».

Шаг изменён вчетверо (0,0125 / 0,025 / 0,05 с) на трёх постановках: проём в стене, помещение с дверью, лестничная клетка. Среднее время выхода последнего изменяется на 0,0…0,6 %, удельный поток створа – на 0,06…0,85 %. Размах по расстановкам больше, 1,7…11,1 %, и изменение немонотонно, поэтому требование [3] к численной схеме выполнено (приложение Г2).

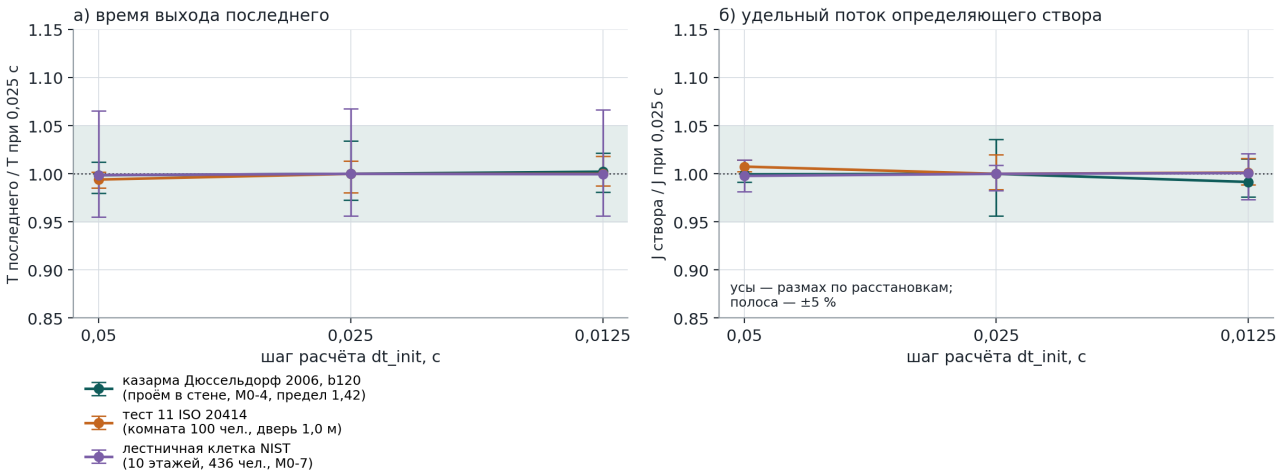


Рисунок 52. Время выхода последнего человека при шаге расчёта 0,05 / 0,025 / 0,0125 с в трёх постановках (проём в стене, помещение с дверью, лестничная клетка). Усы дают размах по расстановкам, полоса – допуск ±5 %

2.10.4 ВАЛИДАЦИЯ

Единственная натурная постановка масштаба «здание целиком» – учебные эвакуации четырёх офисных зданий США по десяти лестничным клеткам (приложение Г10). Схема каждой клетки комплексная: помещение этажа, дверь на площадку, два марша с промежуточной площадкой и поворотом на 180°, вливание потока со следующих этажей и створ выхода внизу. Результат проверяет совместную работу механизмов, а не один из них. При базовой конфигурации с профилем M0-3 по контингенту офисов и пределом потока проёма 1,42 чел/(с·м) расчётное время выхода 95 % населения меньше замеренного во всех десяти клетках. Отклонение составляет 13,8…46,9 % при среднем −32,1 %, и в допуске ±20 % две клетки из них. При откалиброванной конфигурации, в которой профиль заменён на M0-7 по измеренной в учениях категории условий движения [9, табл. 3.5], отклонение составляет −8,6…+14,9 % при среднем +0,4 %, и в допуске десять клеток из десяти. Причины разобраны в разделе 2.7. Трёхучастковая постановка Jülich 2009 рассмотрена в разделе 2.3. Других комплексных натурных постановок в документе нет.

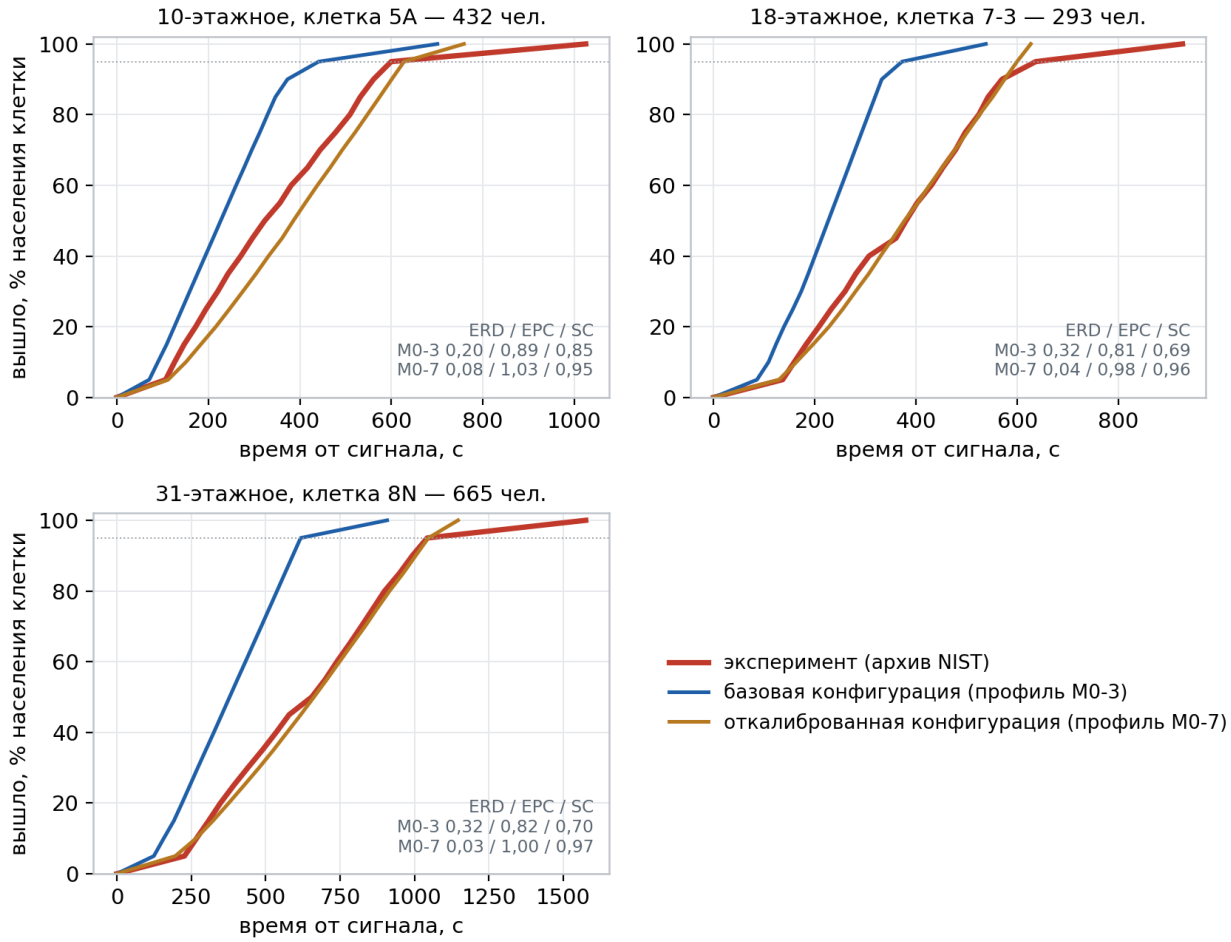


Рисунок 53. Лестничные клетки NIST как комплексная схема: доля вышедших от времени по трём клеткам (5A, 7-3 и 8N) – эксперимент по архиву [46], базовая конфигурация с профилем M0-3 и откалиброванная с M0-7. Кривые расчёта дают среднее трёх расстановок, полоса – размах по ним; в углу меры согласия ERD / EPC / SC

2.10.5 ВЫВОД

На схемах из нескольких участков расчётное время эвакуации при базовой конфигурации меньше аналитического решения гидравлической модели и меньше измеренного на лестничных клетках NIST, то есть служит оценкой снизу, а при откалиброванной конфигурации в допуск входят все расчёты: примеры SFPE в режиме УАМ и все клетки с профилем M0-7.

3 Общие выводы

3.1 Две конфигурации расчёта и порядок применения

Каждый опыт документа рассчитан в базовой конфигурации и, если условия опыта отличаются от расчётного случая методики, в откалиброванной. Определения обеих даны в подразделе 1.3. Порядок сравнения с эталоном изложен в подразделе 1.4. Базовая конфигурация – это расчёт пожарного риска по методике № 1140 [1]. В ней профиль группы мобильности назначается по контингенту и классу здания с табличными параметрами, а предел потока проёма равен 1,42 чел/(с·м) на дверях. Объекты «дверь» стоят на проёмах в стенах и на выходе из расчётной области. По базовой конфигурации судят о применимости программы для расчёта пожарного риска: в какую сторону и насколько отклоняется расчётное время эвакуации при нормативных исходных данных. Откалиброванная конфигурация заменяет отдельные параметры значениями, измеренными в опыте или отвечающими его условиям. По ней судят о том, воспроизводит ли модель движения явление. Конфигурации назначаются до расчёта и по результату сравнения с эталоном не изменяются.

Причин калибровки в документе три, и каждая названа в приложении с источником значения. Первая – эталон вычислен по упрощённой аналитической или гидравлической модели: включается режим УАМ (Г1, Г2, Г3, Г13). По той же причине границы участков оформляются дверями с пределом по виду пути 2,25 чел/(с·м), как в Г4. Вторая – ёмкость створа измерена в опыте и выше нормативного предела. Предел принимается тогда по измеренному значению либо не задаётся: 1,90 чел/(с·м) в лабораторных рядах, 1,796 в российских наблюдениях. Сюда же относится проекция курсанта по антропометрии участников (Г6, Г7, Г9, Г11). Третья – условия движения в опыте отличаются от принятых для эвакуации при пожаре. Если в опыте измерены скорость свободного движения и кривая «скорость–плотность», профиль составляется из них при табличной площади проекции: так в опытах Jülich (Г6, Г8) взяты V_0 = 1,55 м/с и кривая коридора 2009, а в опытах Академии ГПС (Г9) – V_0 = 1,66 м/с и скорости, измеренные в коридоре при плотности 1 и 2 чел/м², вместе с проекцией по антропометрии курсантов и временем разгона 1,1 с по условию опыта – движению по команде. Если измерена только скорость свободного движения, берётся профиль библиотеки, V_0 которого отвечает измеренной категории условий движения [9, табл. 3.5]: М0-7 на учебных эвакуациях NIST, М0-2 по контингенту юношей в манеже Копылова.

Итог по 193 прямым сравнениям времени, удельного потока и скорости в базовой конфигурации и 169 в откалиброванной приведён в таблице. Тест IMO 9 и сравнения с заданной кривой в них не входят. Для сравнений по потоку и скорости знак приведён к времени: расчётный поток или скорость меньше измеренных означают большее расчётное время эвакуации.

Таблица 23. Итог по прямым сравнениям в двух конфигурациях

Род проверки, допуск	Конфигурация	Сравнений	В допуске	Вне допуска: расчётное время эвакуации больше эталонного	Вне допуска: расчётное время эвакуации меньше эталонного
верификация, ±10 %	базовая	57	9	24	24
верификация, ±10 %	откалиброванная (режим УАМ; двери 2,25 чел/(с·м))	53	51	2	0
валидация, ±20 %	базовая	136	23	93	20
валидация, ±20 %	откалиброванная	116	102	14	0

3.2 Обоснование базовой конфигурации с пределом потока дверного проёма

Происхождение предела. Методика требует, чтобы интенсивность через дверной проём при максимальной плотности не превышала q_{Dmax} = 8,5 м/мин при b ⩾ 1,6 м [1, табл. П2.8], и распространяет требование на расчёт любой моделью. При площади проекции 0,1 м² это 8,5/(60 · 0,1) = 1,42 чел/(с·м). Значение действует на створе каждого объекта «дверь» как верхний предел удельного потока. Модель движения сама по себе даёт ёмкость створа 2,4…3,1 чел/(с·м) при профиле M0-3, поэтому без предела расчёт не отвечал бы требованию табл. П2.8.

Предел ниже измеренной ёмкости створа и даёт оценку сверху. Ёмкость створов и узлов, измеренная в пяти натурных источниках, составляет 1,45…3,75 чел/(с·м). Нормативное значение ниже неё на 2…62 %. Это основной довод в пользу базовой конфигурации: предел не превышает ни одной ёмкости, измеренной для здоровых взрослых людей, а поскольку ёмкость растёт с шириной проёма, на широких проёмах разница между измеренной ёмкостью и пределом больше, чем на узких. Для маломобильных групп ёмкость проёма измерена ниже 1,42 чел/(с·м), но там поток через створ в расчёте ограничивает не предел, а кривая профиля группы (раздел 2.9). В базовой конфигурации расчётное время эвакуации из помещений и коридоров с дверями больше экспериментального: в казарме Jülich на +31…+74 %, в коридоре Jülich на +16…+75 %, в опытах Академии ГПС до +161 %. Расчётный поток через проём меньше измеренного во всех 30 точках лабораторных рядов и 15 замерах российских опытов. На аналитических задачах с дверью на выходе расчётное время эвакуации больше решения на +3…+93 %. Оценка сверху сохраняется во всех 41 постановке Jülich и в 12 точках Академии ГПС из 13. Исключение – коридор 20 × 2 м, где дверь роли не играет (−11,9 %).

Именно предел потока проёма даёт оценку сверху при высокой плотности. Кривая «скорость–плотность» (П2.1) воспроизводится расчётом сама до плотности 4,3 чел/м². Плотность 5…7 чел/м² возникает только в очереди перед проёмом, и там скорость задаёт уже не кривая, а предел потока проёма: точки расчёта лежат на гиперболе V = Q/(b·D), ниже кривой (П2.1) на 30…85 % (рисунок в разделе 3.4). Расчётная скорость в очереди при базовой конфигурации не превышает скорости по кривой методики при той же плотности, поэтому расчётное время эвакуации через проём не меньше вычисленного по кривой. Без предела точки очереди при высокой плотности лежали бы выше кривой, как точки встроенного замера (треугольники на рисунке), и требование кривой (П2.1) не выполнялось бы. С пределом они лежат ниже кривой, и расчёт даёт оценку сверху.

3.3 Согласование с экспериментом

Валидация выполнена по семи источникам натурных и лабораторных данных: 136 сравнений в базовой конфигурации и 116 в откалиброванной при допуске ±20 %. В базовой конфигурации в допуск входит 23 сравнения, в откалиброванной – 102. Разница создаётся тремя заменами параметров, каждая по измеренной в опыте величине, и показывает, что модель движения воспроизводит явление, когда её параметры отвечают условиям опыта. В опытах Jülich профиль откалиброванной конфигурации составлен из двух измеренных величин – скорости свободного движения и кривой «скорость–плотность» коридора 2009 – и без изменений перенесён на казарму 2006 и узлы 2014. Так программа применяется к опыту, в котором измерен только профиль движения, и такой перенос подтверждает, что модель движения воспроизводит измеренный поток при измеренном профиле. В опытах Академии ГПС профиль курсанта составлен так же – из измеренных проекции, скорости свободного движения и скоростей при плотности 1 и 2 чел/м² при времени разгона по условию опыта – и воспроизводит все точки трёх опытов. Вне допуска остаётся 14 сравнений, и во всех расчётное время эвакуации больше эталонного.

Строение попутной очереди перед створом ни одна конфигурация не воспроизводит. В лабораторных опытах Jülich участники шли без напора и держали дистанцию при плотности 2…3 чел/м². Расчёт ориентирован на эвакуацию при пожаре, где стоящие сзади напирают на впереди идущих, и уплотняет очередь до верхней части шкалы методики. При действующем пределе потока проёма это не уменьшает расчётное время эвакуации, и оно остаётся оценкой сверху относительно опыта (приложение Г6).

Таблица 24. Опыты документа: число сравнений в допуске ±20 % в двух конфигурациях

Процесс · прил.	Опыт и источник	Базовая конфигурация	Откалиброванная конфигурация
проёмы · Г6	казарма Дюссельдорф 2006 [27]	0 из 13	12 из 13
коридоры · Г6	коридор Дюссельдорф 2009 [30]	3 из 28	18 из 28
проёмы · Г7	ряды по ширине проёма 0,4…5,0 м [27;34;32]	2 из 30	27 из 30
проёмы, слияние · Г8	узлы Jülich 2014: Т-слияние, поворот, проём, сужение [31]	0 из 7	7 из 7
коридоры, проёмы · Г9	опыты Академии ГПС: комната 2 × 2 м, коридор 20 × 2 м, проём 0,8 м [26;25]	2 из 13	13 из 13
лестницы · Г10	лестничные клетки четырёх офисных зданий NIST [45]	2 из 10	10 из 10
проёмы · Г11	российские опыты по проёму 0,7…2,5 м [18;19;23]	3 из 15	15 из 15
маломобильные · Г12	натурные ряды групп М1…М4 [16;21]	11 из 20	–

3.4 Соответствие методике № 1140

Величины методики воспроизводятся. Скорость свободного движения 27 профилей отличается от табличной по модулю не более чем на 1,26 %, площади проекций – на 0,04 % [1, табл. П2.6, П2.7]. Скорости переноски по табл. П2.9 воспроизводятся с отклонением 1,50 %, а кривая «скорость–плотность» (П2.1) укладывается в ±10 %. Время прохода коридора 40 м отличается от аналитического на +0,7 с, поток через створ не превышает заданного предела (−0,7 %). Критерии всех четырнадцати проведённых тестов ISO 20414 [5] выполнены. Выполнен и тест IMO 9 [6], где отношение времён составляет 2,00 и 1,99 при требуемом 2,00.

Аналитические решения упрощённой аналитической модели воспроизводятся в режиме УАМ. Задачи пособия 1–27 [10] входят в допуск ±10 % в 26 случаях из 27 (−2,3…+16,0 %). Вне допуска остаётся задача 10-2, где перед проёмом 1,2 м стоят 40 человек. Задачи слияния 28–42 при дверях на границах участков с пределом по виду пути входят в допуск в 14 случаях из 15 (+3,9…+10,9 %); вне допуска задача 32-2. Интенсивность через проёмы шести ширин по табл. П2.8 воспроизводится в 6 постановках из 6, а примеры гидравлической модели SFPE [36] укладываются в допуск в 4 случаях из 4 (−6,3…−0,4 %).

Кривая «скорость–плотность» работает сама до плотности 4,3 чел/м², а при большей плотности скорость задаёт предел потока проёма. На сводном рисунке точки расчёта пяти постановок приложения Г2 при плотности до 4,3 чел/м² лежат на кривой (П2.1) в допуске ±10 %: скорость определяет сама зависимость методики. Плотность 5…7 чел/м² возникает только в очереди перед проёмом, и там точки лежат не на кривой, а на гиперболе предела потока V = Q/(b·D), ниже кривой на 30…85 %. Скорость в очереди при базовой конфигурации ниже, чем даёт зависимость методики при той же плотности, поэтому расчётное время эвакуации через проём больше вычисленного по кривой: предел потока проёма даёт оценку сверху относительно самой зависимости.



Профиль М0-3, V_0 = 1,67 м/с; точки очереди лежат на гиперболе потока проёма, а не на кривой; встроенный замер совпадает со значением кривой при плотности по мере ядра с точностью 0,2 %.

Рисунок 54. Кривая (П2.1) и точки расчёта при базовой конфигурации по пяти постановкам приложения Г2. По оси абсцисс плотность, чел/м², по оси ординат скорость, м/с. Точечными линиями показана гипербола предела потока V = Q/(b·D) для проёмов 3,0 и 1,2 м

Следствия для расчёта пожарного риска. Профиль назначается по контингенту и классу функциональной пожарной опасности [1, табл. П2.3, П2.4], параметры профиля остаются табличными, предел потока проёма – 1,42 чел/(с·м), режим УАМ не включается. Объекты «дверь» задаются на проёмах в стенах и на выходе из расчётной области. Профиль по измеренным в опыте величинам или по категории условий движения, отличной от повышенной активности, и снятие предела потока проёма применяются вне расчёта пожарного риска, для воспроизведения опытов.

Приложение Г1. Тесты ISO 20414: четырнадцать базовых тестов

Г1.1 Источник и данные

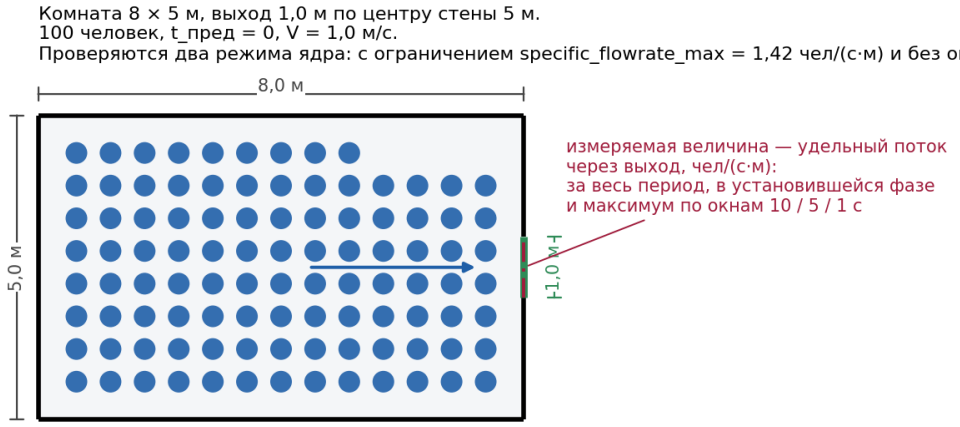
Международный стандарт ISO 20414:2020 «Fire safety engineering – Verification and validation protocol for building fire evacuation models» [5] задаёт протокол проверки расчётных моделей эвакуации: набор постановок с заранее известным ответом, на которых разработчик обязан показать, что программа воспроизводит движение людей так, как оно в неё заложено. Приложение верификационное: расчёт сравнивается с аналитическим решением постановки либо с зависимостью, поданной модели на входе, а не с данными натурного эксперимента (раздел 1.5). Общие требования к оценке расчётных методов установлены в [3]. Допуск документа при верификации равен ±10 %.

Стандарт ISO 20414 делит тесты на **базовые** 1–13, **поведенческие** 14–17, **взаимодействие с пожаром** 18–19 и **привязанные к зданию** 20–21. Проведены четырнадцать тестов: все базовые и тест 17. Численных допусков стандарт ISO 20414 не устанавливает намеренно: он требует, чтобы погрешность и границы применимости были измерены и опубликованы [5, разд. 1]. По каждому тесту приведены и состояние по критерию стандарта ISO 20414, и числовое отклонение от эталона там, где эталон числовой. Буквой **b** обозначена ширина проёма в тестах 1, 5, 8, 9, 10 и 11, марша в 3, 10 и 12 или рампы в 7.

Таблица 25. Четырнадцать тестов ISO 20414, проведённых для ядра

№	Название	Что проверяет	Критерий стандарта ISO 20414 [5]
1	Назначение времени начала эвакуации	индивидуальное назначение	времена согласуются с заданной кривой
2	Скорость свободного движения в коридоре	удержание скорости, изотропию, разгон	проход 40 м за 40 с
3	Скорость движения по лестнице	удержание скорости вдоль наклона	10 м по наклону за 10 с вверх и вниз
4	Движение за угол	обход угла, потоки до и после него	траектории не выходят за стены
5	Назначение характеристик населения	воспроизведение распределения скорости свободного движения	скорости согласуются с заданной кривой
6	Встречные потоки	сопротивление встречному движению	время растёт с числом встречных
7	Обгон человека с ограниченной подвижностью	влияние медленного крупного человека	зона 1 сценария 1 выходит позже
8	Назначение выхода	исполнение назначенного выхода	назначенные идут к своим выходам
9	Динамическая доступность выхода	реакция на закрытие выхода	закрытый выход не используется
10	Скопление перед лестницей	цепочку скоплений по элементам пути	скопление у двери, поток в коридоре, скопление у марша
11	Наибольший поток через проём	соблюдение заданного предела	поток за весь период не выше максимума
12	Потоки по лестнице	зависимость потока от ширины марша	росту ширины отвечает рост потока
13	Связь потока, плотности и скорости в коридоре	воспроизведение заданной кривой	замеры отвечают допущениям модели
17	Выбор маршрута по геометрии	работу подмодели выбора пути	путь отвечает заложенному алгоритму

ISO 20414, Test 11. Предельный поток через проём — постановка источника



Источник постановки: ISO 20414:2020 «Fire safety engineering — Verification and validation protocol for building fire evacuation models», раздел 5, Test 11 (Maximum flow rates at an opening/exit); геометрия — по Annex B и конспекту верификация/конспекты/02-iso-20414.md.

Рисунок 55. Постановка теста 11 в изложении стандарта ISO 20414: помещение 8 × 5 м с единственным проёмом 1,0 м и 100 людьми, для которых проверяется наибольший удельный поток через створ (по [5], разд. 5)

Постановки и критерии приёмки заданы разделом 5 и приложением B стандарта ISO 20414, поэтому данные полны по построению. Величины, оставленные на усмотрение разработчика, и принятые значения перечислены в таблице. Она же служит перечнем общих параметров расчёта во всех тестах приложения.

Таблица 26. Что задано стандартом ISO 20414 и что принято в расчёте

Величина	Задана стандартом ISO 20414	Принято в расчёте
Геометрия, число человек, кривые распределения	да, разд. 5 и Annex B; кривые скоростей – по [39]	–
Численный допуск	нет, намеренно	состояние ставится по критерию стандарта ISO 20414, числовое отклонение приводится для сведения и оценивается по допуску документа ±10 %
Скорость свободного движения V_0	1,0 м/с в тестах 2 и 3; в тестах 5, 8, 10 – кривые распределения (в тестах 8 и 10 – U(0,97; 1,62) м/с); в тесте 7 – 1,25 и 0,80 м/с по горизонтали, 0,40 м/с на рампе	1,00 м/с в остальных тестах – то же значение
Кривая «скорость–плотность»	нет	задана таблицей, та же, что в расчётных моделях (приложение Е); её воспроизведение проверяет тест 13
Проекция человека, проходной диаметр	нет; габарит 0,75 м в тесте 7	круг Ø 0,357 м, f = 0,1 м², 0,28 м – как в методике [1] и в руководстве [6]
Время разгона	нет; тест 2 требует отчитаться о вкладе разгона	1,5 с; в тесте 2 приведено также время прохода при разгоне, стремящемся к нулю
Время начала эвакуации	задано кривой распределения в тесте 1	0 в остальных тестах
Предел потока проёма, режим УАМ	нет; порог задаётся при постановке проверки, 1,33 чел/(с·м) [6] приведён как пример	1,42 чел/(с·м) при выключенном режиме УАМ – значение базовой конфигурации [1, табл. П2.8]; в тестах 6, 12 и 13 постановка требует створов без ограничения потока
Расстановка и число расчётов	«множественные расчёты» без числа	случайная расстановка, 3–5 расчётов со сменой начального числа, в таблицах приведён размах

Г1.2 Расчётная модель и конфигурации расчёта

Каждый тест – отдельная расчётная модель, геометрия и население которой взяты из постановки стандарта ISO 20414. Параметры человека здесь задаёт стандарт ISO 20414, а не методика [1], поэтому библиотечные профили групп мобильности не применяются. Если постановка не оговаривает иного, человек представлен кругом Ø 0,357 м площадью 0,1 м² с проходным диаметром 0,28 м, скоростью свободного движения 1,00 м/с и временем разгона 1,5 с (таблица блока Г1.1). Частные значения даны в описаниях тестов. Выполнено 128 расчётов: там, где стандарт ISO 20414 требует нескольких, постановка посчитана в 3–5 расстановках со сменой начального числа, и в таблицах приведён размах.

Базовая конфигурация применена во всех четырнадцати тестах. Откалиброванная конфигурация нужна в одном тесте, 11-м: его критерий есть соблюдение заданного предела потока проёма, а таким заданным пределом служит аналитическая зависимость [1, табл. П2.8], которую воспроизводит режим УАМ. В остальных тестах результат пределом потока проёма не определяется, поэтому откалиброванная конфигурация в них не требуется.

Таблица 27. Конфигурации расчёта

Параметр	Базовая конфигурация	Откалиброванная конфигурация (режим УАМ)	Источник значения
Предел потока проёма	1,42 чел/(с·м), одно значение на все створы; в тестах 6, 12 и 13 постановка требует створов без ограничения потока	вычисляется по ширине проёма; для b = 1,0 м – 6,25 м/мин ≡ 1,042 чел/(с·м) при f = 0,1 м²	[1, табл. П2.8]; происхождение значения 1,42 – раздел 2.6
Режим УАМ	выключен: предел потока проёма задан значением	включён: предел вычисляется по приложению № 6 методики	устройство переключателя – раздел 2.6
Проекция, скорость свободного движения, время разгона	по постановке теста	те же	[5]; кривые распределения скоростей – [39]
Геометрия, число человек, расстановка	по постановке теста	те же	[5]
Где применена	все четырнадцать тестов	тест 11	–

Г1.3 Результаты и анализ

Каждый тест разобран отдельно: постановка одной-двумя фразами, критерий стандарта ISO 20414, измеренное значение и состояние.

ТЕСТ 1. НАЗНАЧЕНИЕ ВРЕМЕНИ НАЧАЛА ЭВАКУАЦИИ

Проверяется, что программа назначает каждому человеку собственное время начала эвакуации из заданного распределения. Десять человек и три кривые распределения: первая U(10; 100) с, по 5 расчётов на каждую кривую. Вторая кривая N(55; 15) с, третья логнормальная с медианой 40 с, итого 150 назначенных времён.

Таблица 28. Тест 1, критерий и результат

Критерий ISO 20414	Результат при базовой конфигурации	Состояние
Времена согласуются с заданной кривой [5, тест 1]	Все 150 времён внутри области определения своей кривой: 11,1…98,4, 21,2…86,6 и 13,0…114,7 с. Гипотеза принадлежности не отвергается ни в одном из 15 расчётов: p критерия Колмогорова–Смирнова 0,111…0,880	пройден

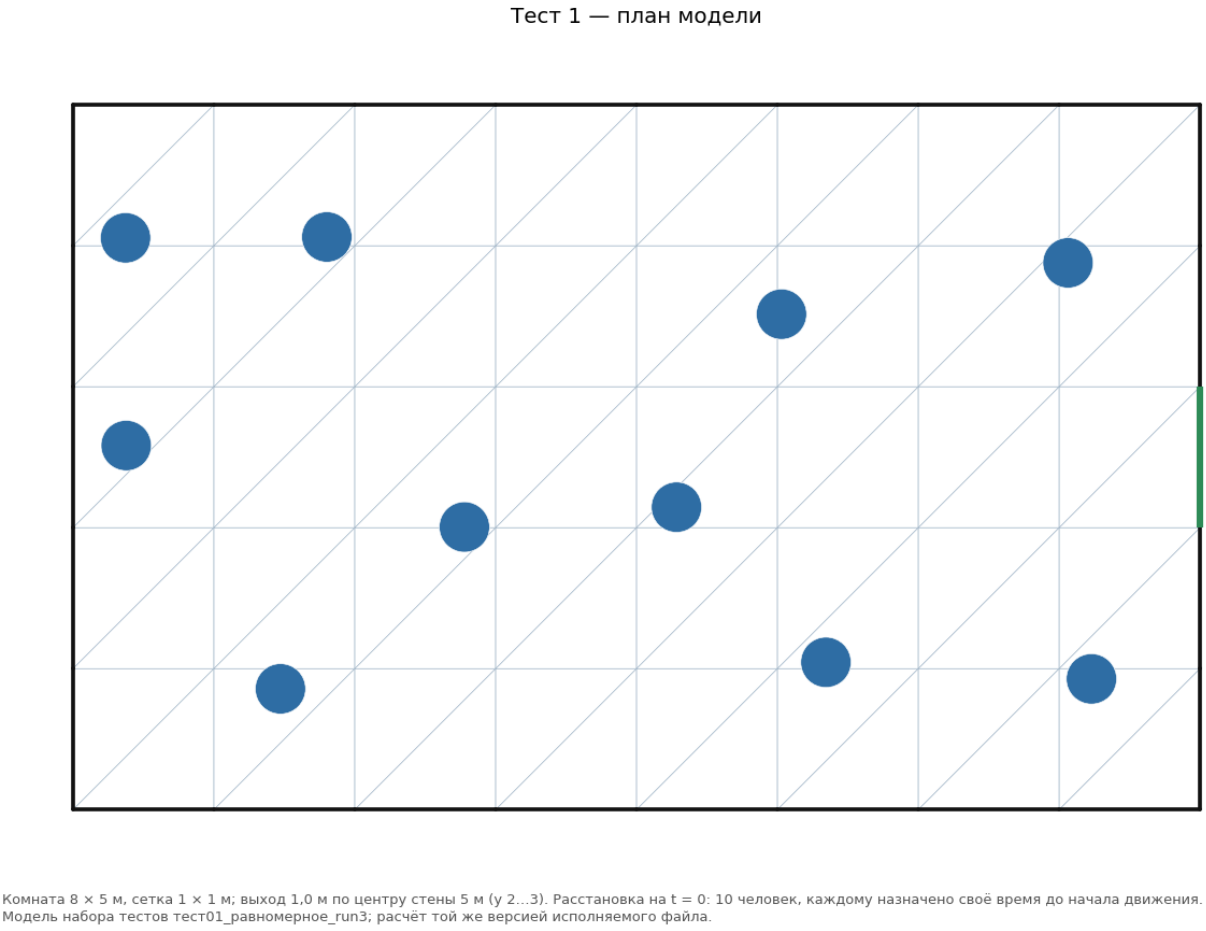
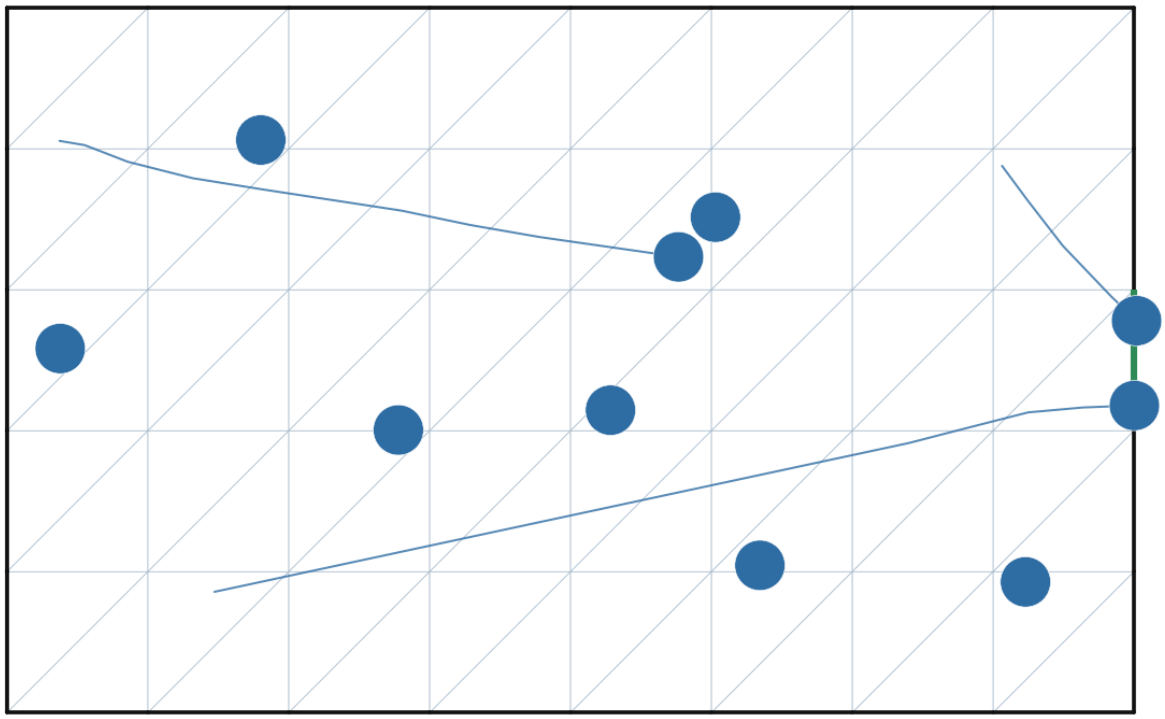


Рисунок 56. Тест 1. План модели: плита 8 × 5 м, сетка 1 × 1 м, створ 1,0 м; расстановка десяти человек на нулевой секунде

Тест 1 — кадр расчёта, t = 49 с



Времена начала движения разыграны из U(10; 100) с. К этому моменту тронулись трое: чем раньше назначено время, тем длиннее пройденный путь; остальные семеро ещё стоят на местах, и следа у них нет. Тонкие линии — пройденный путь каждого человека от места старта до этого момента. В модели на этот момент 10 человек.
Модель набора тестов тест01_равномерное_run3; расчёт той же версией исполняемого файла.

Рисунок 57. Тест 1. Кадр расчёта на 49-й секунде: тонкие линии показывают пройденный путь. Трое уже идут, и чем раньше назначено время начала движения, тем длиннее след; остальные семеро ещё стоят на местах

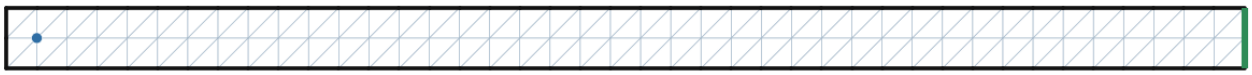
ТЕСТ 2. СКОРОСТЬ СВОБОДНОГО ДВИЖЕНИЯ В КОРИДОРЕ

Проверяется, что одиночный человек идёт с заданной ему скоростью и не теряет её на поворотах расчётной сетки. Один агент, путь 40,0 м, V_0 = 1,0 м/с. Стандарт ISO 20414 требует показать также чувствительность к повороту геометрии (не менее двух ориентаций сетки) и вклад разгона.

Таблица 29. Тест 2, критерий и результат

Критерий ISO 20414	Результат при базовой конфигурации	Состояние
«Человек должен пройти коридор за 40 с» [5, тест 2]	40,73 с при времени разгона 1,5 с (**+1,8 %**); при разгоне, стремящемся к нулю, – 39,98 с (−0,06 %). При ориентациях сетки 0° и 45° время одинаково – 40,725 с, разница 0,00 с	пройден

Тест 2 — план модели



Коридор x ∈ [−1; 40], y ∈ [−1; 1]; выход во всю ширину 2,0 м при x = 40. Человек в точке (0; 0) — геометрический путь ровно 40,000 м.
Модель набора тестов тест02_угол00_a15; расчёт той же версией исполняемого файла.

Рисунок 58. Тест 2. План модели: плита 2 × 41 м, выход во всю ширину при x = 40

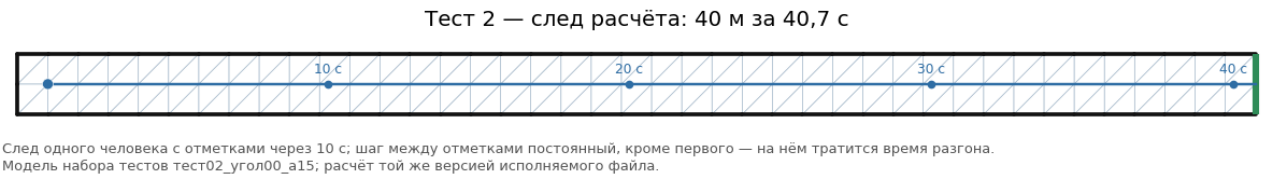


Рисунок 59. Тест 2. След расчёта с отметками через 10 с: после разгона шаг постоянный

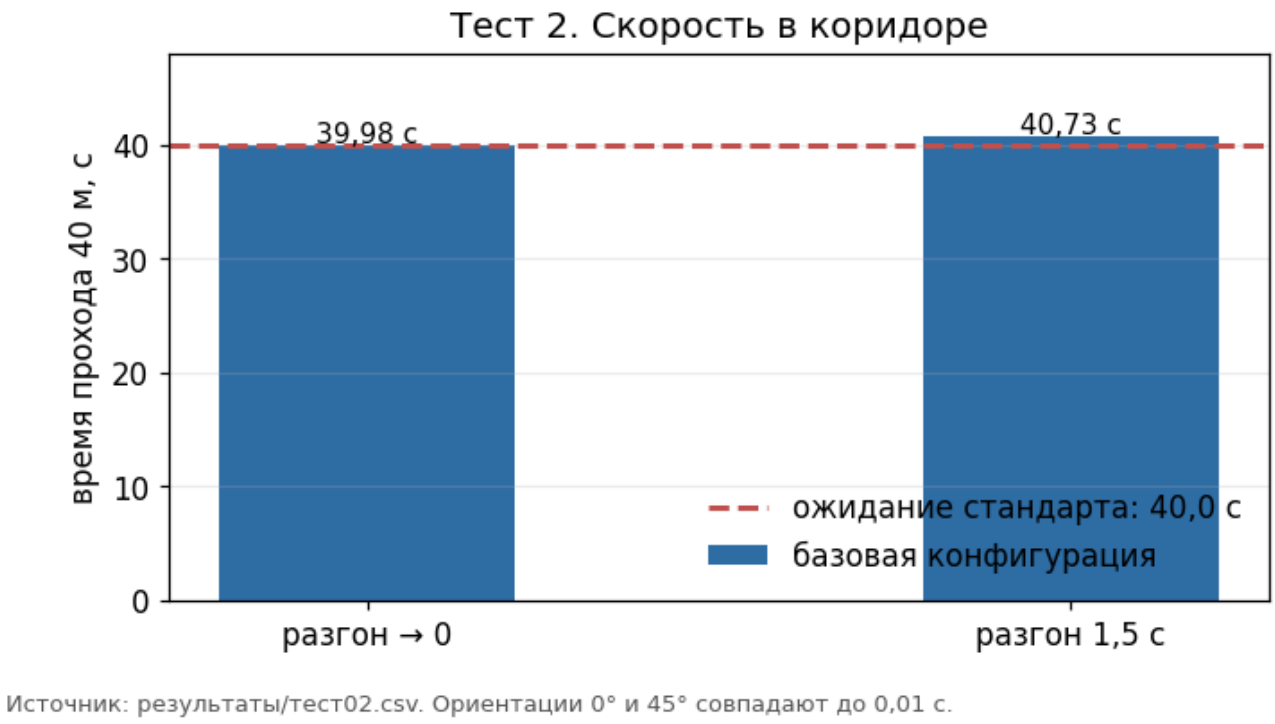


Рисунок 60. Тест 2. Проход 40 м при базовой конфигурации с разгоном 1,5 с и при разгоне, стремящемся к нулю, против 40 с, ожидаемых стандартом ISO 20414. По оси ординат время, с

ТЕСТ 3. СКОРОСТЬ ДВИЖЕНИЯ ПО ЛЕСТНИЦЕ

Проверяется, что скорость на марше выдерживается по наклонной длине, а не по её проекции на план. Тот же замер на марше b = 2 м: 10 м по наклону вверх и вниз, уклон 45°. Скорость на марше вверх и вниз задана равной горизонтальной (доли 1,0): тест проверяет наклонную длину пути по п. 10 прил. № 5 методики [1], а не снижение скорости на лестнице.

Таблица 30. Тест 3, критерий и результат

Критерий ISO 20414	Результат при базовой конфигурации	Состояние
10 м по наклону за 10 с вверх и вниз [5, тест 3]	вверх 10,00 с на 9,92 м наклонной длины – скорость 0,992 м/с (**+0,8 %** по скорости); вниз 9,90 с на 9,90 м – 1,000 м/с (0,0 %)	пройден

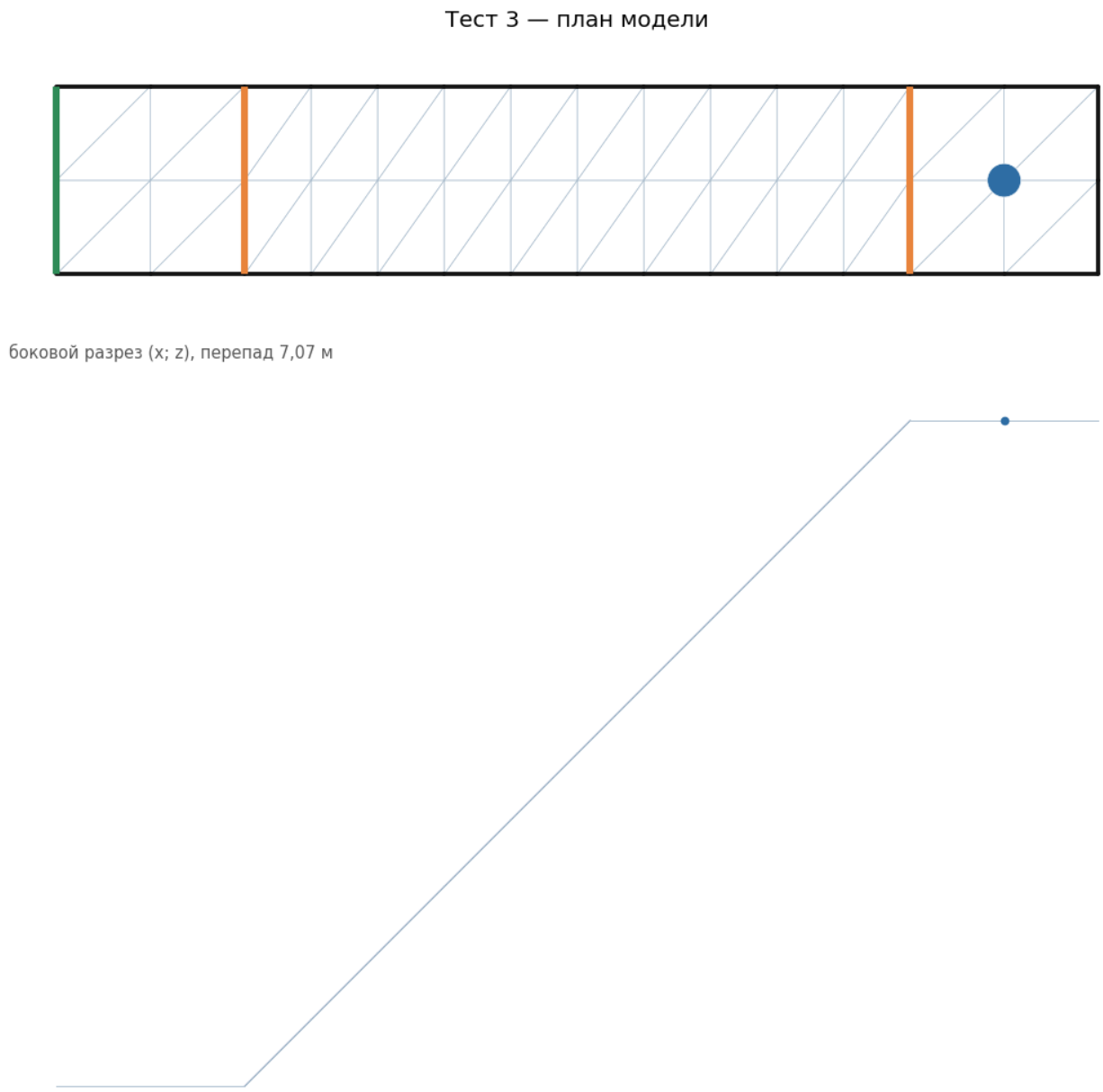


Рисунок 61. Тест 3. План модели: площадки по 2 м, марш 45° (проекция и подъём по 7,071 м)

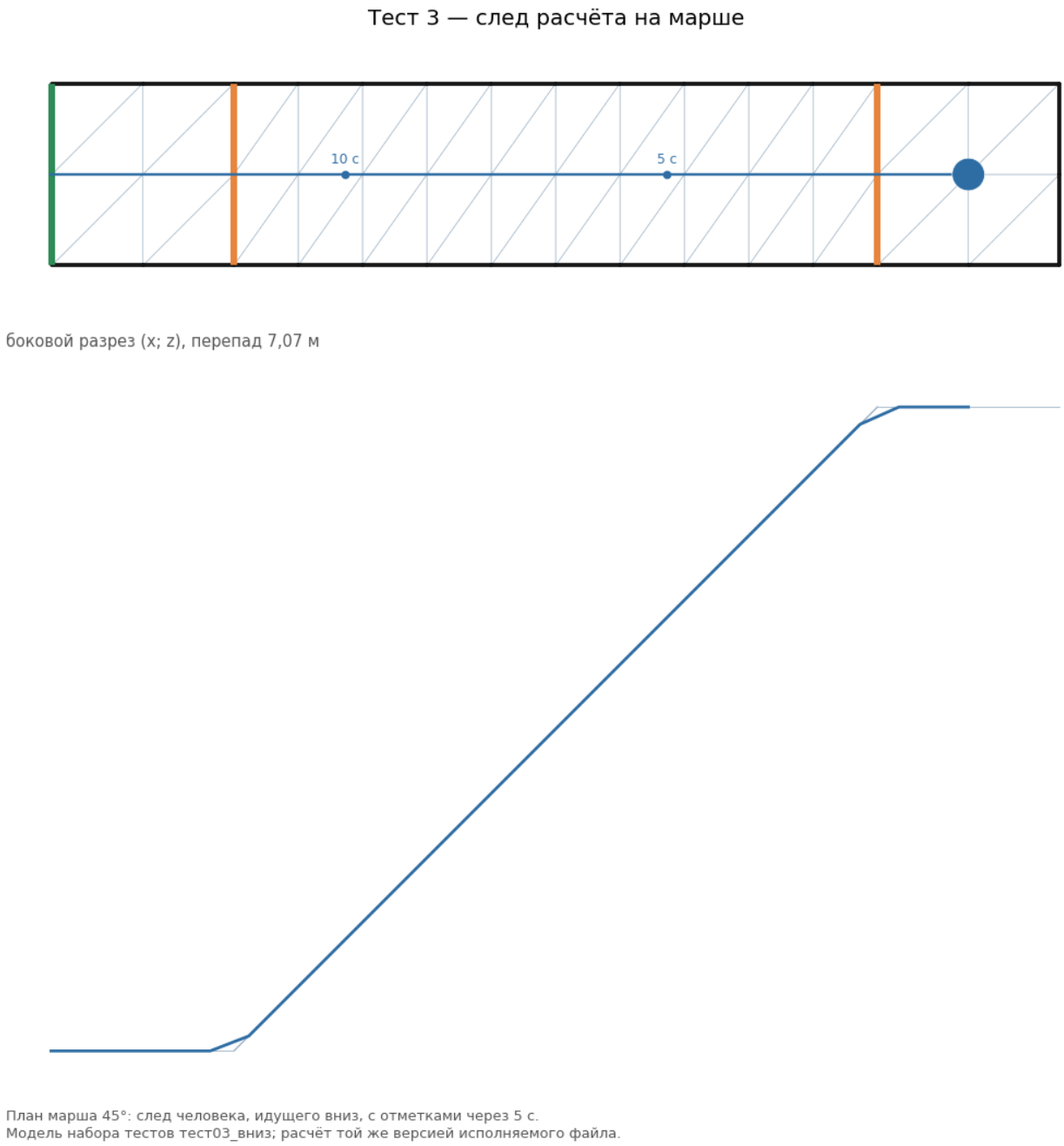


Рисунок 62. Тест 3. След расчёта на марше в плане с отметками через 5 с и разрез

ТЕСТ 4. ДВИЖЕНИЕ ЗА УГОЛ

Проверяется, что при повороте пути люди не выходят за стены и что поворот не создаёт устойчивого скопления. Двадцать агентов проходят Г-образный коридор. Замеряются потоки до и после угла.

Таблица 31. Тест 4, критерий и результат

Критерий ISO 20414	Результат при базовой конфигурации	Состояние
Траектории не выходят за стены [5, тест 4]; дополнительно – потоки до и после угла и наличие скопления	Ни одна из примерно 27 000 проверенных точек траекторий в пяти расчётах не вышла за границу коридора; наименьшее расстояние от центра проекции до стены 0,1399 м при проходном радиусе 0,140 м. Поток до угла 1,86…2,10 чел/с, после угла 1,42…1,49 (**−26 %**); устойчивого скопления нет, размах времён выхода 13,8…15,0 с	пройден

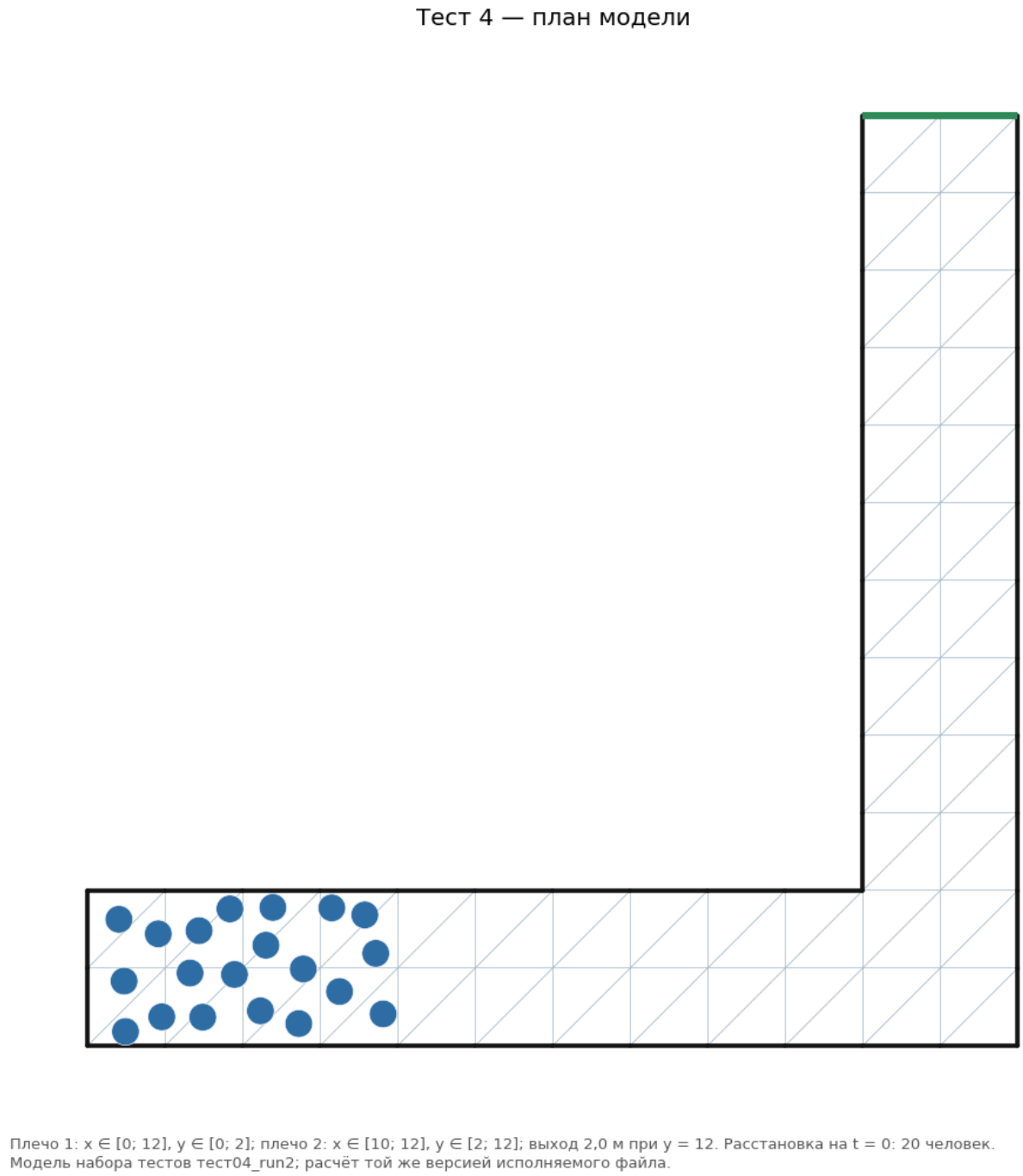


Рисунок 63. Тест 4. План модели: плечи 12 × 2 и 2 × 10 м, выход 2,0 м в торце

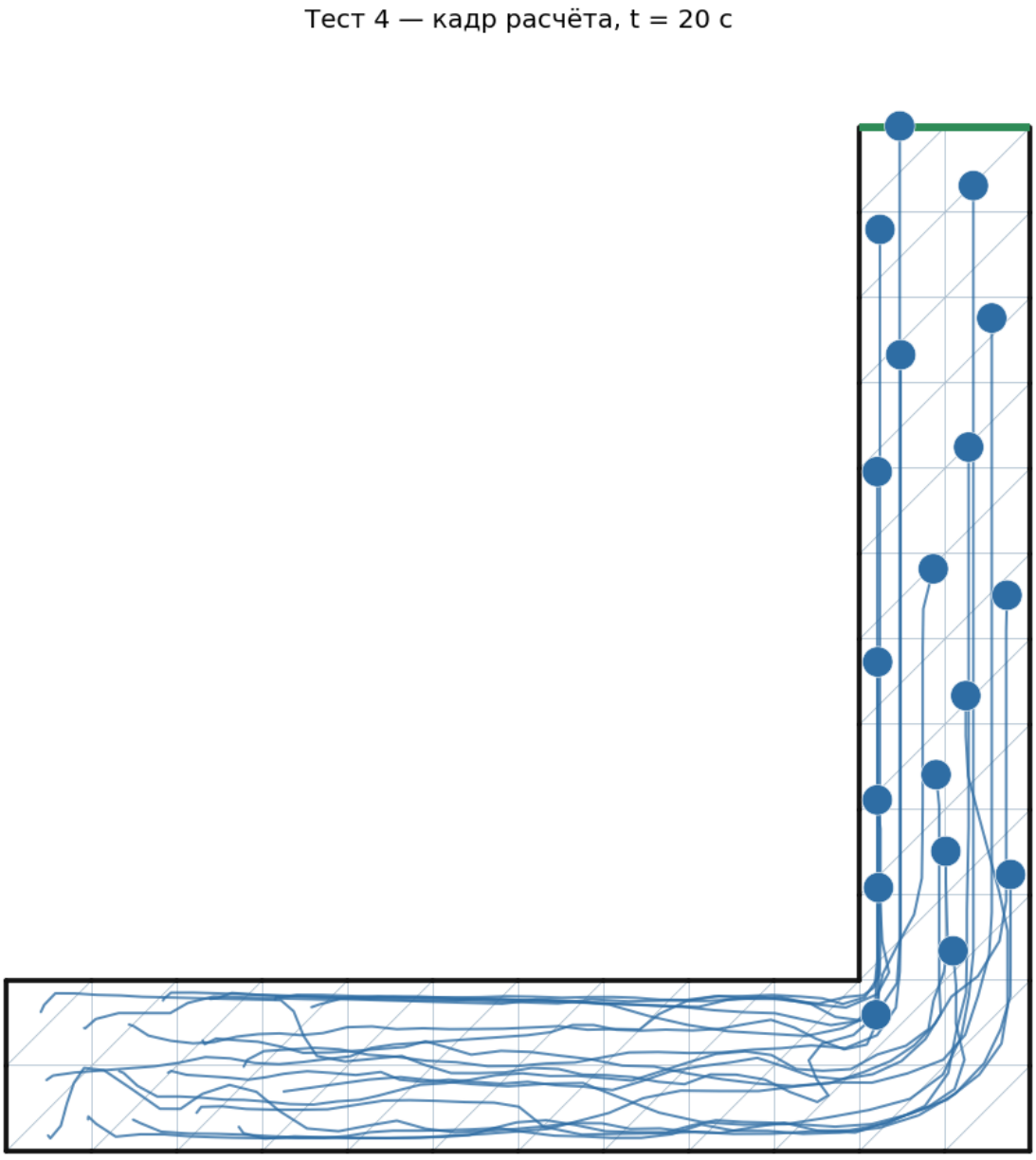


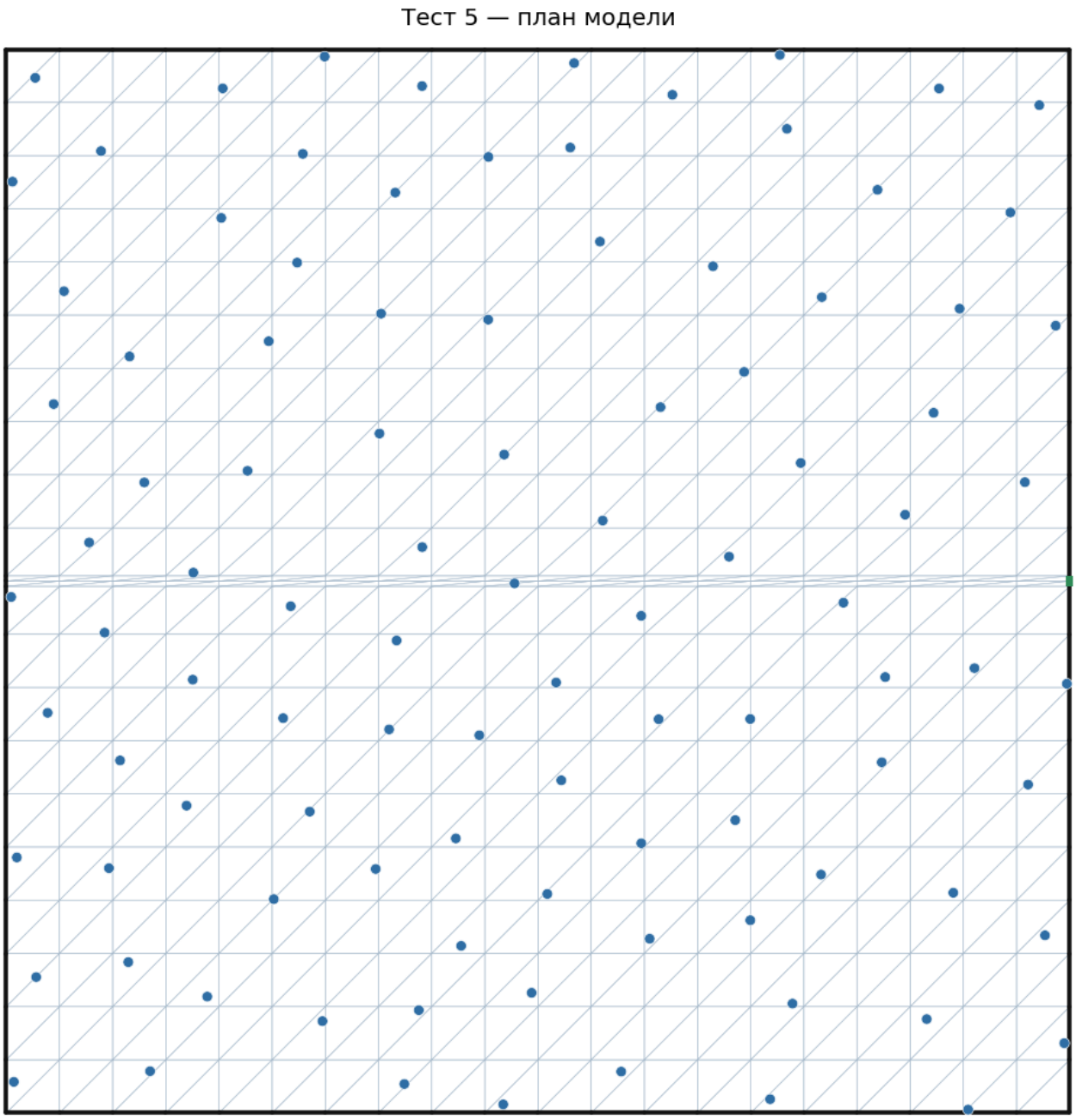
Рисунок 64. Тест 4. Кадр расчёта на 20-й секунде: тонкие линии показывают пройденный путь каждого человека, у внутреннего угла видна область повышенной плотности

ТЕСТ 5. НАЗНАЧЕНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК НАСЕЛЕНИЯ

Проверяется воспроизведение заданного распределения скорости свободного движения. Сто человек, три кривые распределения скорости, по 5 расчётов, итого 1500 скоростей.

Таблица 32. Тест 5, критерий и результат

Критерий ISO 20414	Результат при базовой конфигурации	Состояние
Скорости согласуются с заданной кривой [5, тест 5]	Все 1500 скоростей внутри области определения своей кривой; для U(0,97; 1,62) м/с измеренные границы 0,972…1,618 м/с, среднее 1,295 против теоретического 1,295. Гипотеза принадлежности не отвергается ни в одном из 15 расчётов: p = 0,063…0,910	пройден



Площадка 100 × 100 м, сетка 5 × 5 м, выход 1,0 м. Расстановка на t = 0: 100 человек со скоростями из U(0,97; 1,62) м/с. Проекции показаны увеличенными: в масштабе плана круг Ø 0,357 м неразличим.
Модель набора тестов тест05_равномерное_run1; расчёт той же версией исполняемого файла.

Рисунок 65. Тест 5. План модели: площадка 100 × 100 м, сетка 5 × 5 м, выход 1,0 м

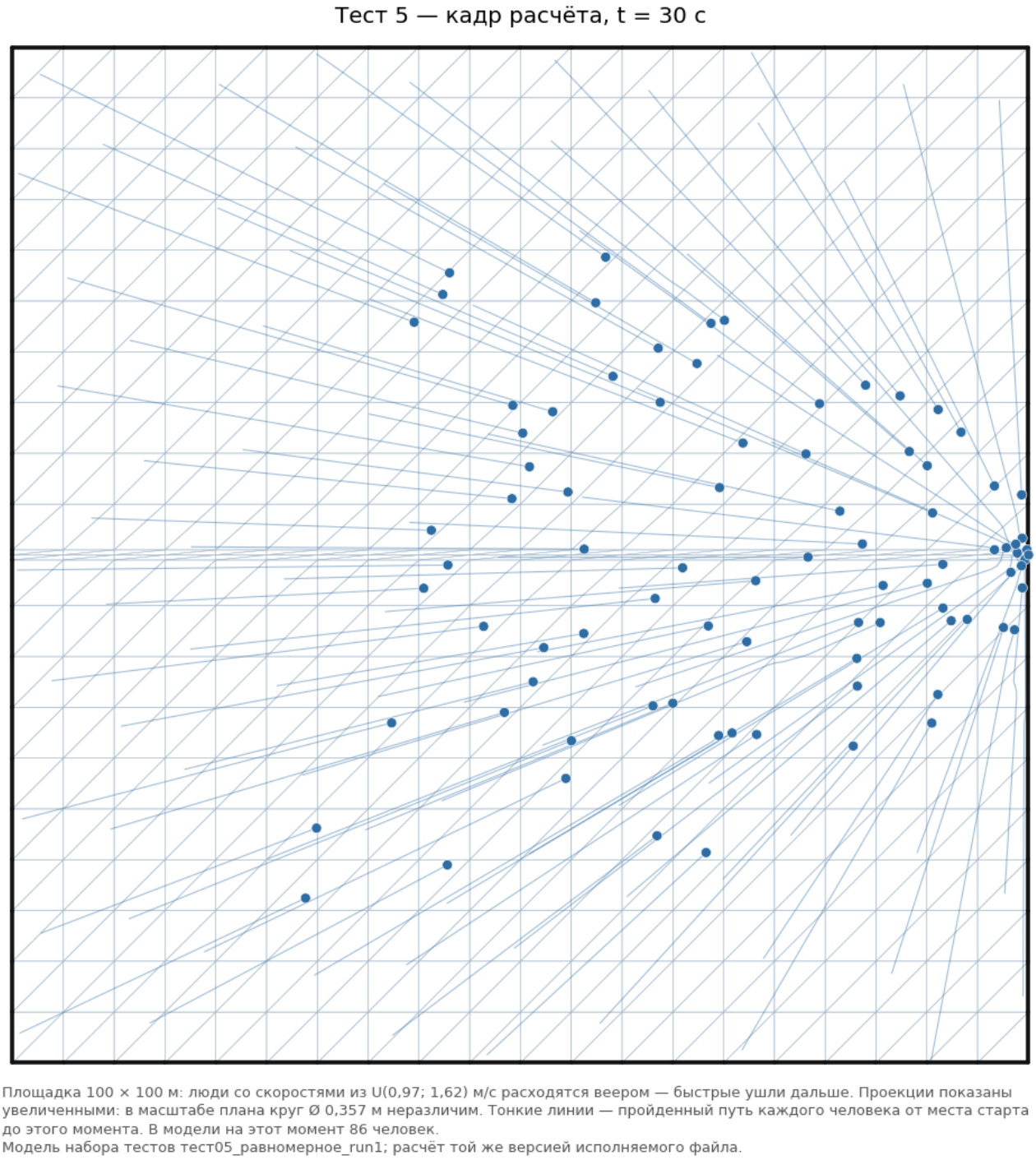


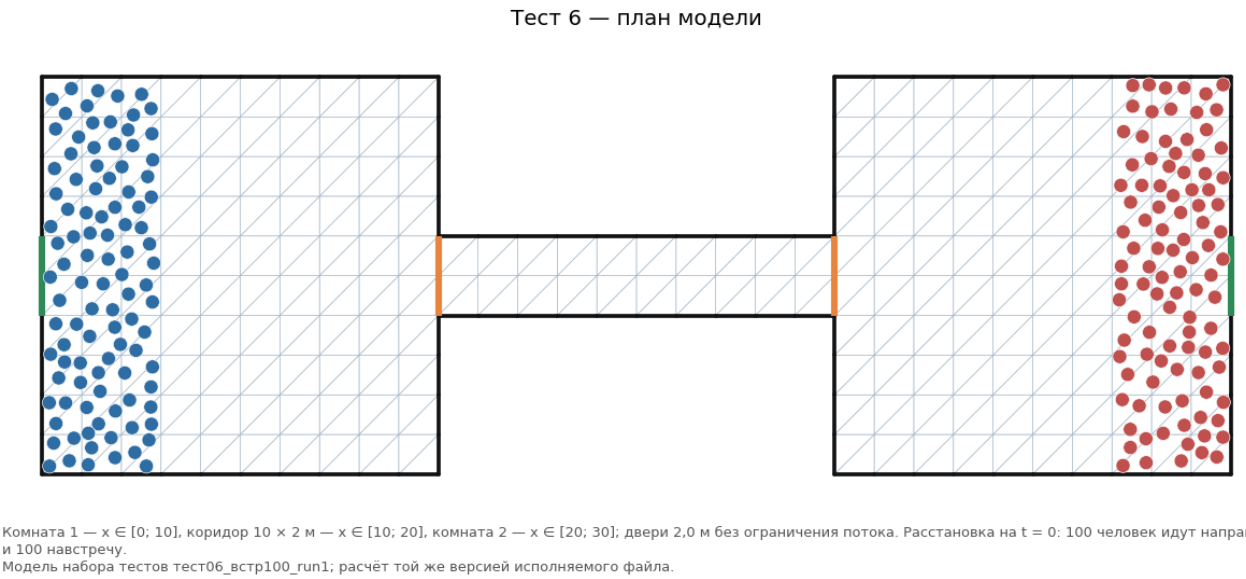
Рисунок 66. Тест 5. Кадр расчёта на 30-й секунде: тонкие линии показывают пройденный путь, при разных скоростях он различается по длине. Проекции показаны увеличенными

ТЕСТ 6. ВСТРЕЧНЫЕ ПОТОКИ

Проверяется, что встречное движение задерживает поток и что задержка растёт с числом встречных. Сто агентов идут из комнаты 1 в комнату 2 навстречу 0, 10, 50 и 100 агентам. Замеряется время входа последнего из первой группы во вторую.

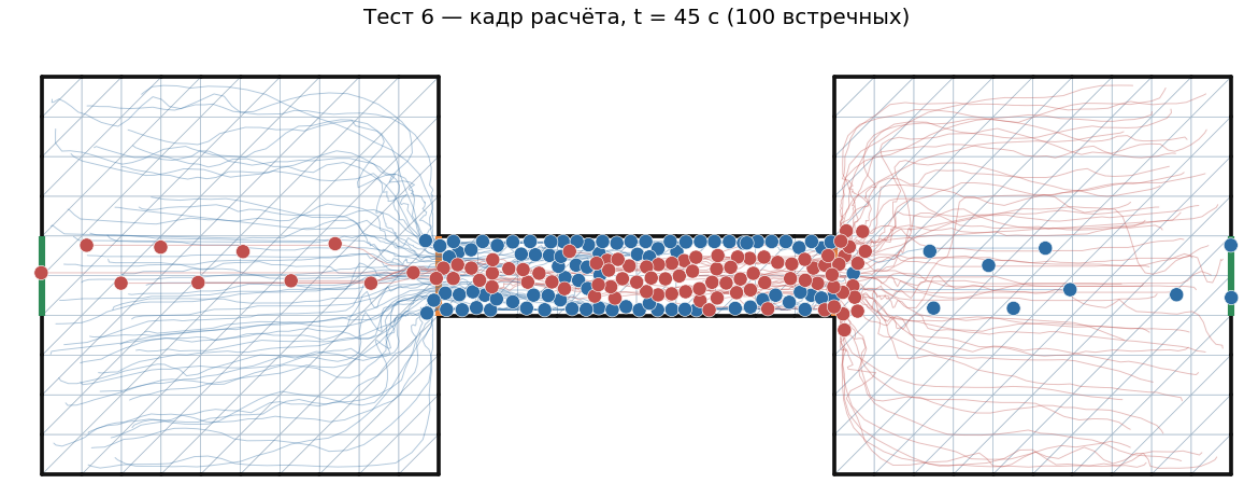
Таблица 33. Тест 6, критерий и результат

Критерий ISO 20414	Результат при базовой конфигурации	Состояние
Время растёт с числом встречных [5, тест 6]; отдельно требуется задокументировать долговременные блокировки	60,0 → 63,4 → 80,4 → 118,2 с при 0 / 10 / 50 / 100 встречных (**+5,7 / +34,0 / +96,9 %**). Рост монотонный во всех пяти расчётах, полосы размаха соседних шагов не пересекаются. Долговременных блокировок нет: во всех 20 расчётах расчётную область покинули все агенты, наибольшее непрерывное время агента в скоплении растёт с 16,6 до 91,1 с	пройден



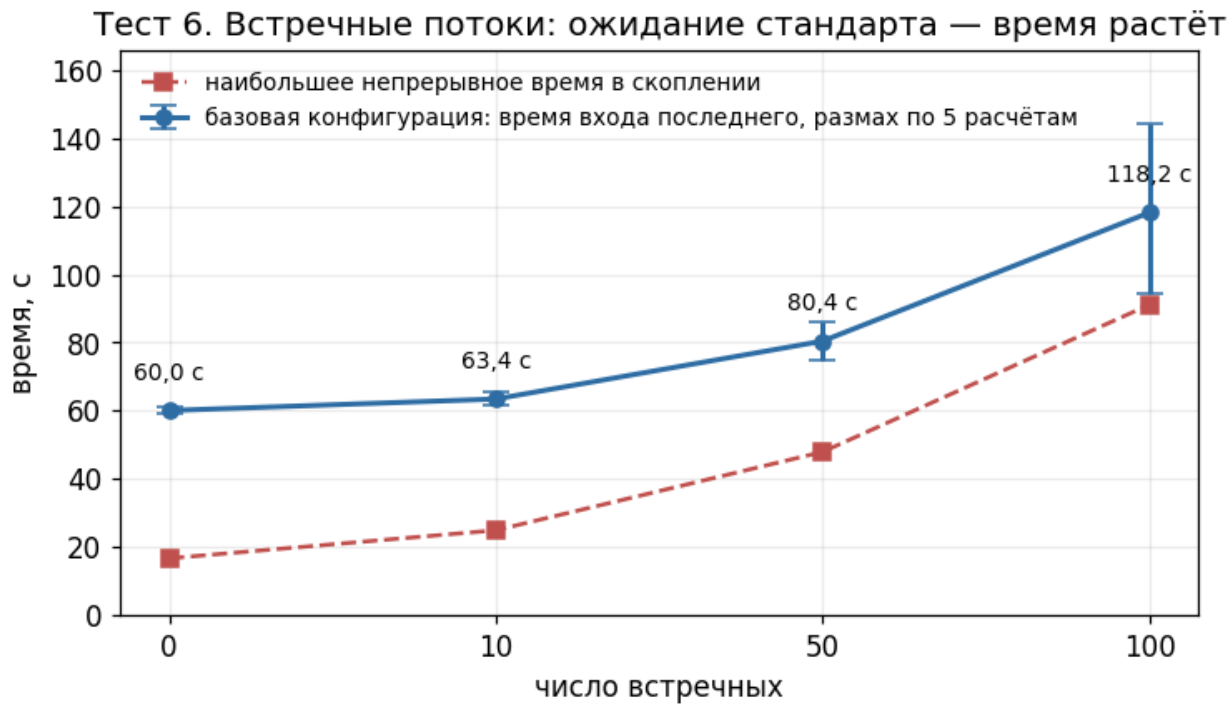
Комната 1 — x ∈ [0; 10], коридор 10 × 2 м — x ∈ [10; 20], комната 2 — x ∈ [20; 30]; двери 2,0 м без ограничения потока. Расстановка на t = 0: 100 человек идут направо и 100 навстречу.
Модель набора тестов тест06_встр100_run1; расчёт той же версией исполняемого файла.

Рисунок 67. Тест 6. План модели: комнаты 10 × 10 м, коридор 10 × 2 м, двери 2,0 м без ограничения потока



Расхождение встречных потоков в коридоре 10 × 2 м. Тонкие линии — пройденный путь каждого человека от места старта до этого момента. Чтобы следы не сливались, показан след каждого второго человека. В модели на этот момент 191 человек.
Модель набора тестов тест06_встр100_run1; расчёт той же версией исполняемого файла.

Рисунок 68. Тест 6. Кадр расчёта на 45-й секунде при 100 встречных: цвет показывает направление движения, тонкие линии – пройденный путь каждого второго человека; в коридоре потоки расходятся



Источник: руководство/данные/тест06.csv, по 5 расчётов на шаг.

Рисунок 69. Тест 6. Вход последнего человека и наибольшее время в скоплении по числу встречных при базовой конфигурации. По оси абсцисс число встречных, по оси ординат время, с. Усы показывают размах по пяти расстановкам

ТЕСТ 7. ОБГОН ЧЕЛОВЕКА С ОГРАНИЧЕННОЙ ПОДВИЖНОСТЬЮ

Проверяется, что медленный крупный человек задерживает идущих за ним. Двадцать четыре агента. В первом сценарии перед ними идёт человек с ограниченной подвижностью (0,80 м/с, на рампе 0,40 м/с, габарит 0,75 м), во втором такого ограничения нет. Обгон отдельно не задаётся, и при габарите 0,75 м на рампе 1,4 м второй полосы не остаётся.

Таблица 34. Тест 7, критерий и результат

Критерий ISO 20414	Результат при базовой конфигурации	Состояние
Зона 1 сценария 1 выходит позже зоны 1 сценария 2 [5, тест 7]	34,0 с (33,1…35,0) против 29,2 с (28,7…29,7) – **+16,4 %** по последнему и +18,1 % по среднему; полосы размаха не пересекаются ни в одной из пяти пар расчётов. Агент с ограниченной подвижностью проходит путь в 2,4 раза дольше, чем заменяющий его агент сценария 2: 27,2 против 11,2 с	пройден

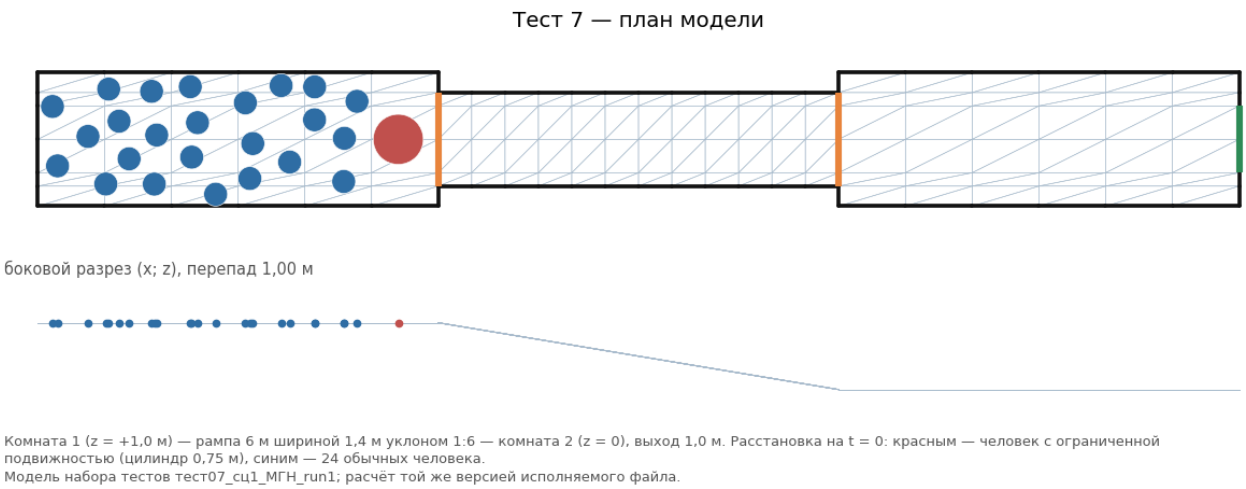


Рисунок 70. Тест 7. План модели: комнаты 6 × 2 м, рампа 1,4 м уклоном 1:6, выход 1,0 м

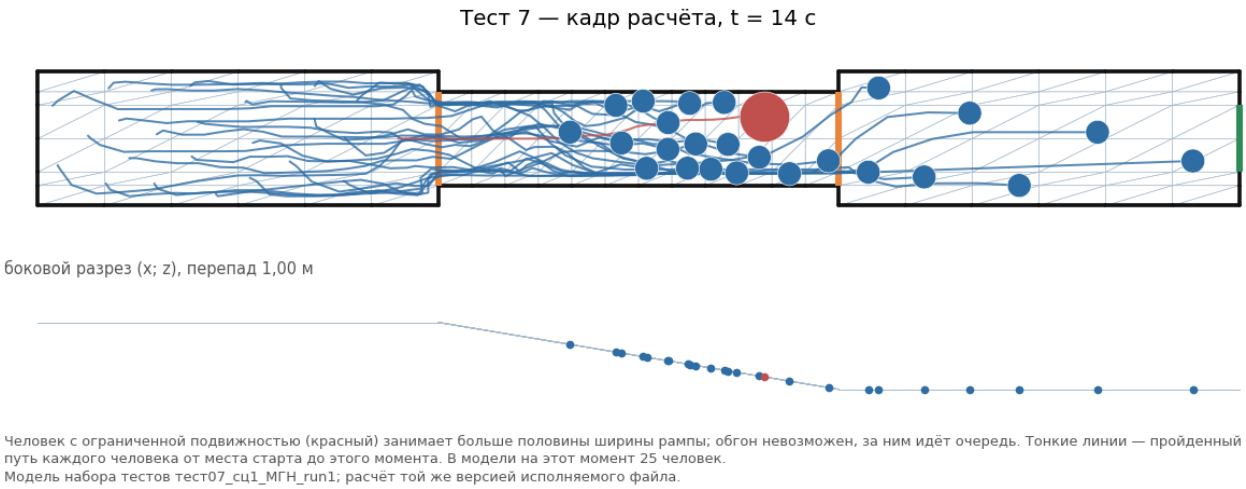
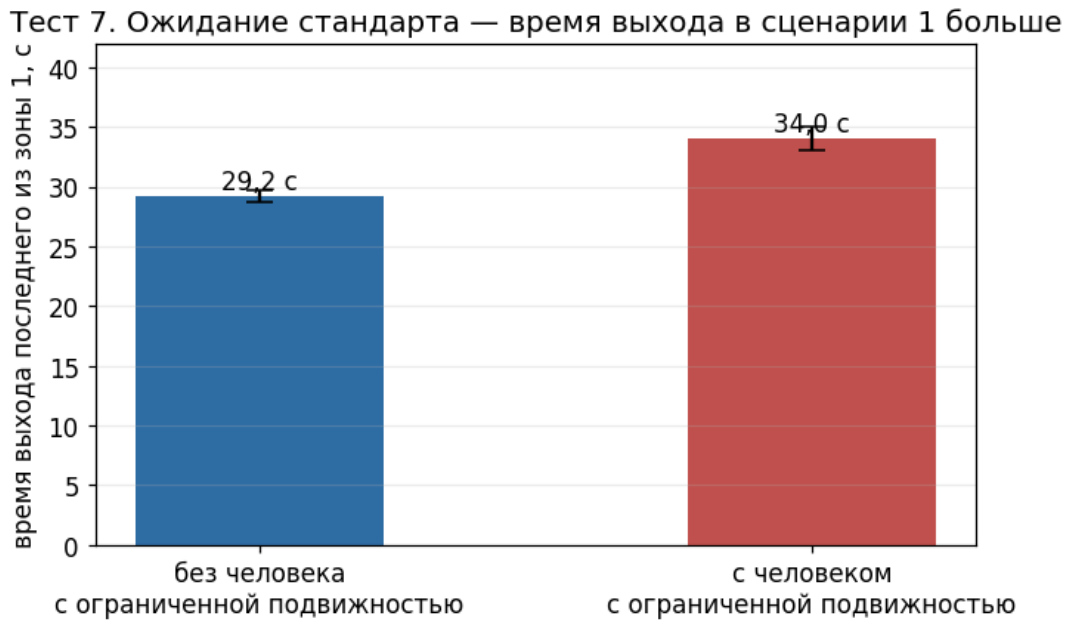


Рисунок 71. Тест 7. Кадр расчёта на 14-й секунде: красной показана проекция человека с ограниченной подвижностью, тонкие линии – пройденный путь; позади него идёт очередь



Источник: руководство/данные/тест07.csv, по 5 расчётов; усы — размах. Полосы размаха двух сценариев не пересекаются.

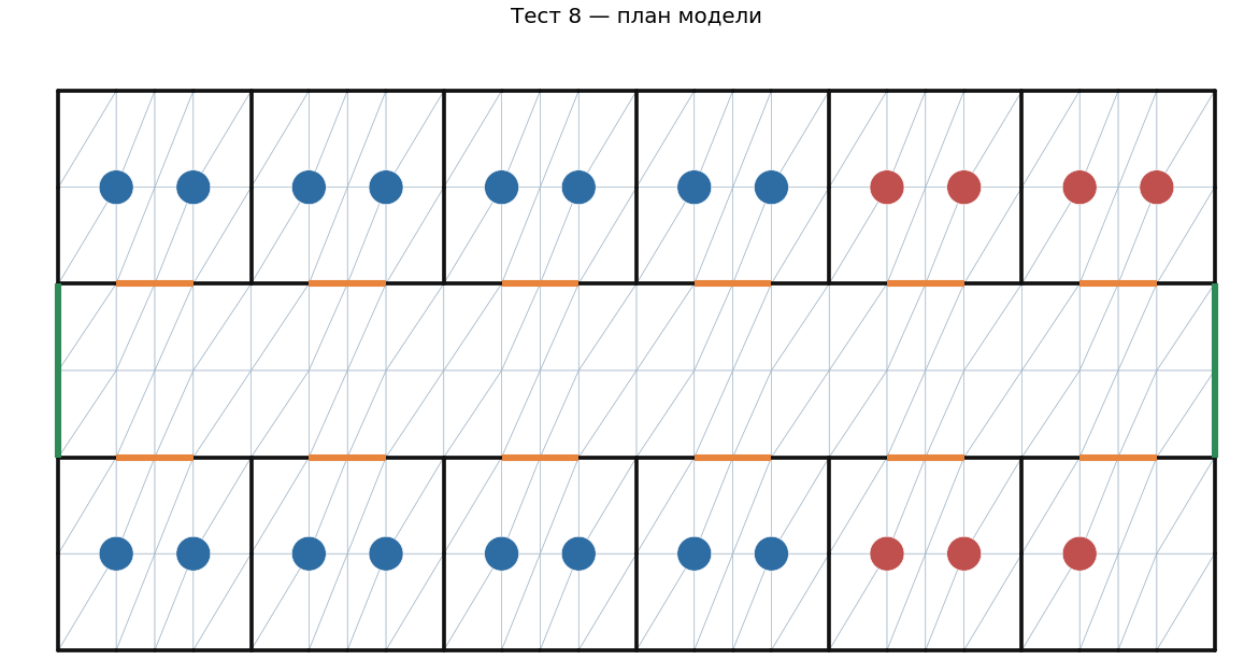
Рисунок 72. Тест 7. Выход последнего агента из зоны 1 в сценариях с человеком ограниченной подвижности впереди и без него при базовой конфигурации. По оси ординат время, с. Усы показывают размах по пяти расстановкам

ТЕСТ 8. НАЗНАЧЕНИЕ ВЫХОДА

Проверяется, что назначенный человеку выход исполняется, даже когда он не ближайший. Двадцать три человека. Восьми каютам назначен главный выход, остальным – второй (та же постановка приведена как задача 10 [6]).

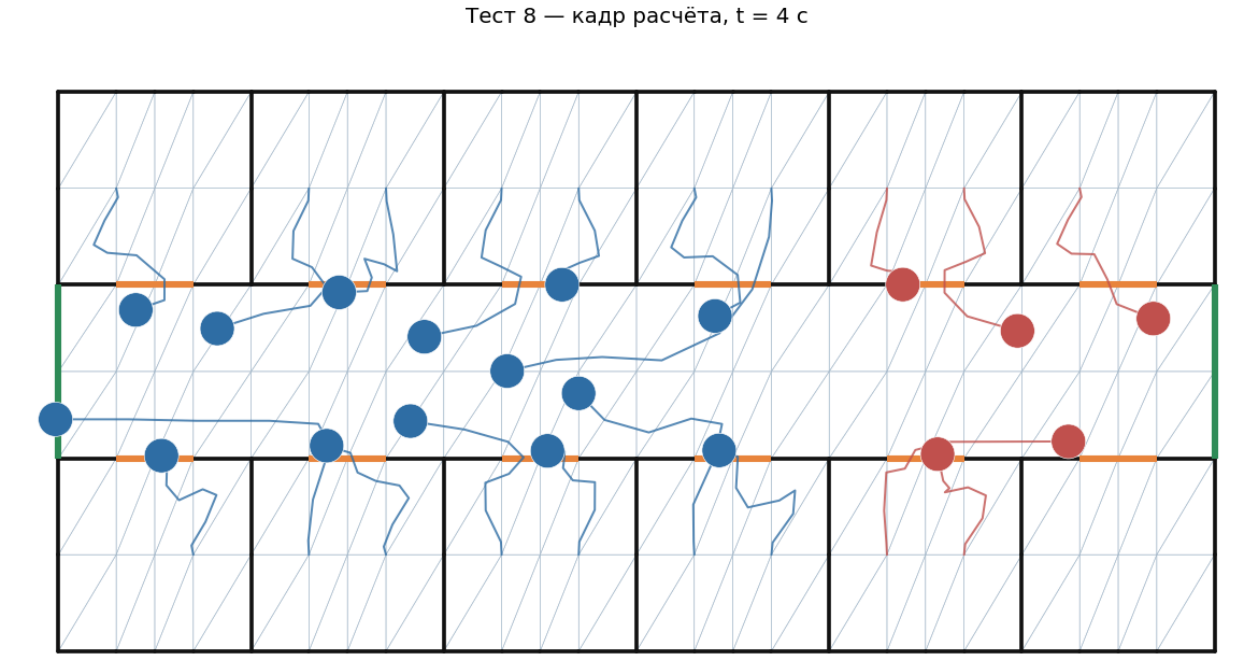
Таблица 35. Тест 8, критерий и результат

Критерий ISO 20414	Результат при базовой конфигурации	Состояние
Назначенные идут к своим выходам [5, тест 8]	23 из 23 ушли к назначенному выходу (**100 %**). Если на той же геометрии и расстановке назначение отменить и оставить правило «идти к ближайшему», к тем же выходам уходят 19 из 23 (82,6 %): четверо из кают у середины коридора уходят к другому выходу	пройден



12 кают 2 × 2 м, двери кают 0,8 м; выходы 1,8 м при x = 0 и x = 12. Расстановка на t = 0: 23 человека, цвет — назначенный выход (16 синих к выходу при x = 0, 7 красных к выходу при x = 12).
Модель набора тестов тест08_назначенный; расчёт той же версией исполняемого файла.

Рисунок 73. Тест 8. План модели: коридор 1,8 × 12 м, 12 кают 2 × 2 м, два выхода 1,8 м; цветом показан назначенный выход – 16 человек к выходу при x = 0, 7 к выходу при x = 12



Цвет — назначенный выход: синие идут к выходу при x = 0, красные — к выходу при x = 12. Четверо синих стартовали ближе к правому выходу, но идут к назначенному левому. Тонкие линии — пройденный путь каждого человека от места старта до этого момента. В модели на этот момент 19 человек.
Модель набора тестов тест08_назначенный; расчёт той же версией исполняемого файла.

Рисунок 74. Тест 8. Кадр расчёта на 4-й секунде: цветом показан назначенный выход – синие идут к выходу при x = 0, красные к выходу при x = 12. Тонкие линии показывают пройденный путь: четверо синих стартовали ближе к правому выходу, но идут к назначенному левому

ТЕСТ 9. ДИНАМИЧЕСКАЯ ДОСТУПНОСТЬ ВЫХОДА

Проверяется, что закрытый по ходу расчёта выход перестаёт использоваться. Один агент стоит ближе к выходу 1, который закрывается на первой секунде. Геометрия взята по рисунку 6 стандарта ISO 20414: оба выхода у одного торца комнаты 10 × 15 м, человек у противоположного торца. Старт смещён на 1,5 м с осевой линии в сторону выхода 1 (13,0 м против 14,1 м), чтобы ближний выход был определён однозначно.

Таблица 36. Тест 9, критерий и результат

Критерий ISO 20414	Результат при базовой конфигурации	Состояние
«Выход 1 человеком не используется» [5, тест 9]	Доля использования выхода 1 – **0 %**, выхода 2 – 100 %; время 14,88 с, путь 14,08 м. Если выход 1 оставить открытым, тот же агент идёт в выход 1 (13,80 с, 12,92 м)	пройден

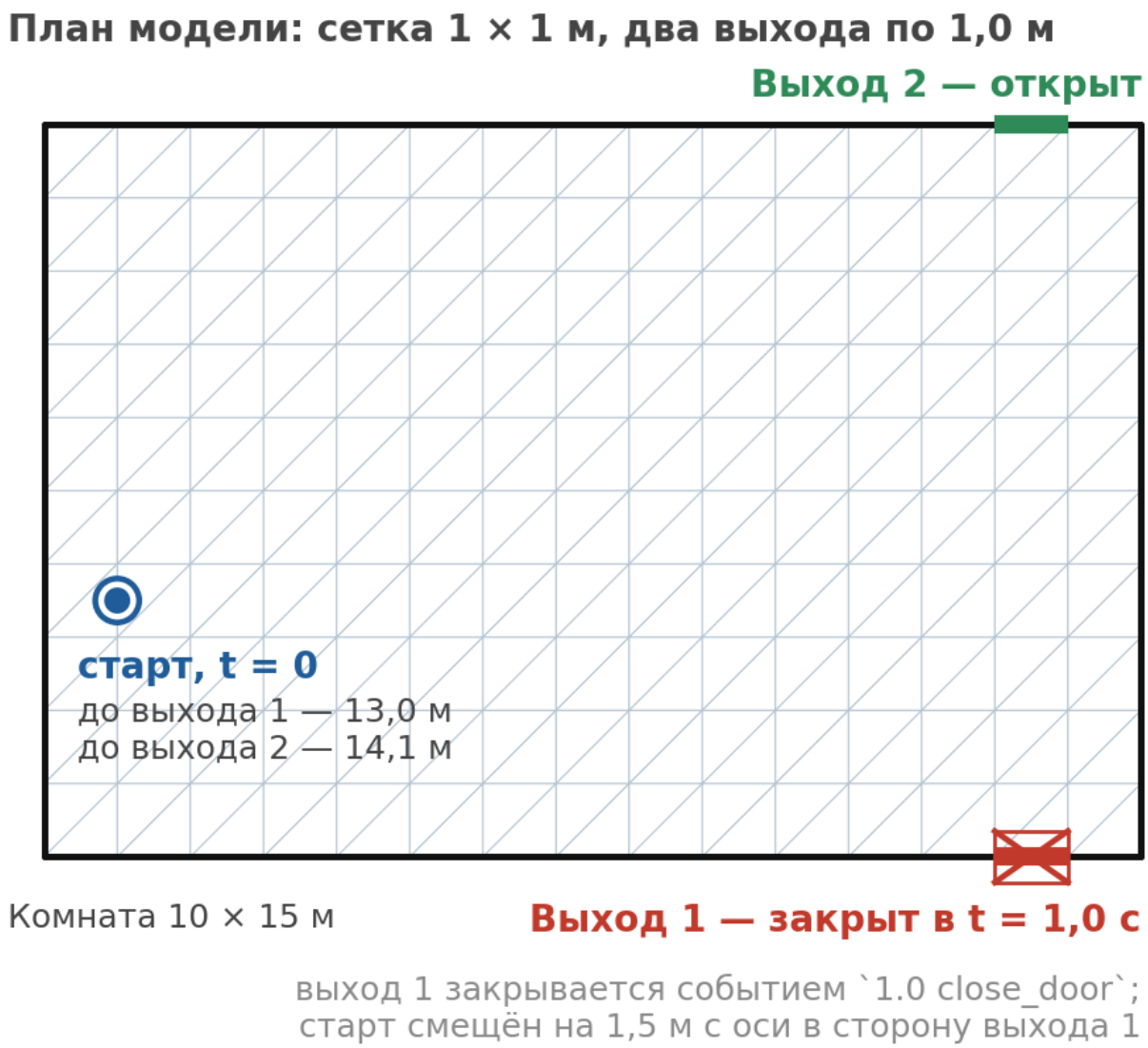


Рисунок 75. Тест 9. План модели: комната 10 × 15 м, два выхода по 1,0 м у одного торца (по рисунку 6 стандарта ISO 20414), первый закрывается на t = 1,0 с

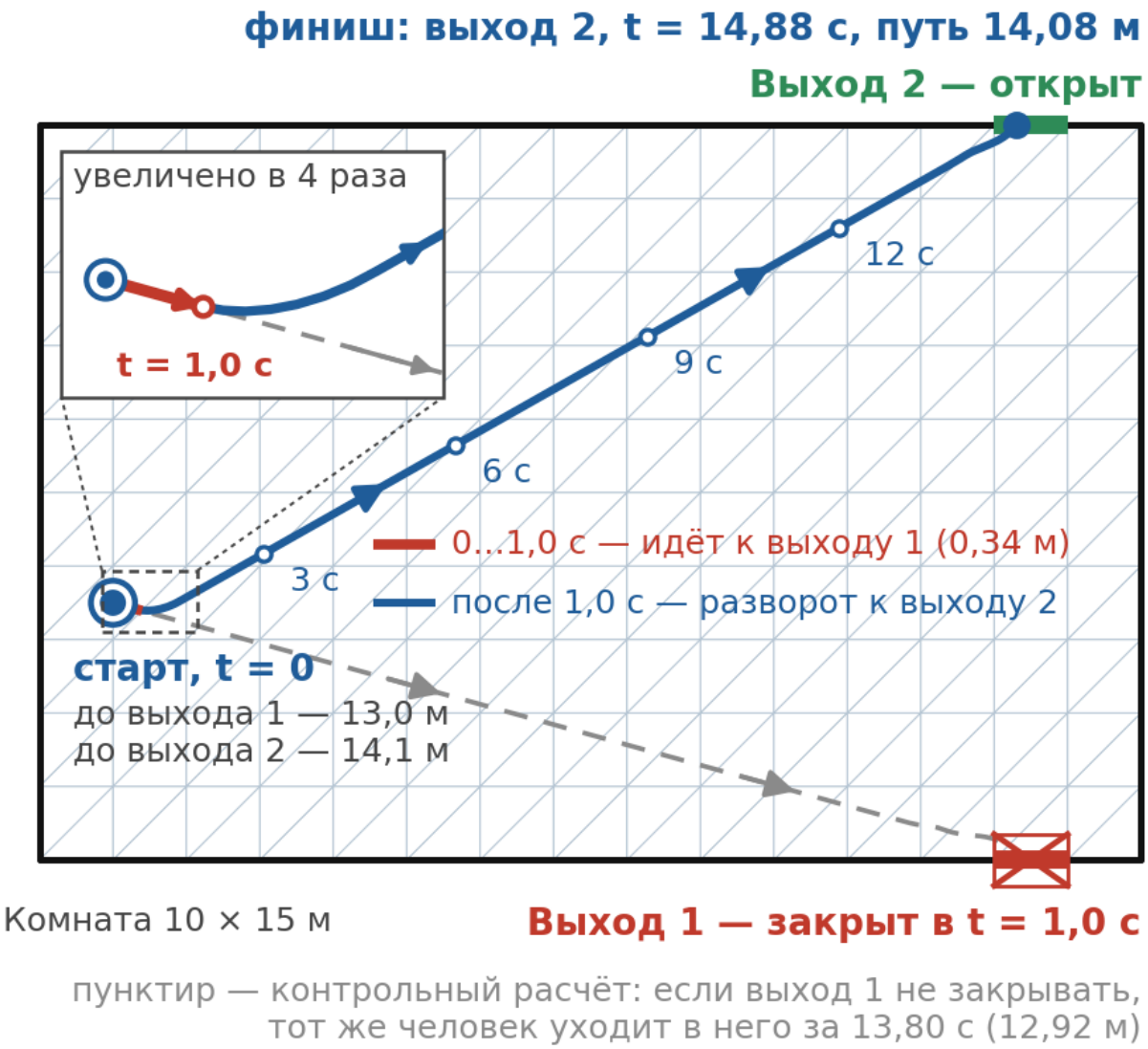


Рисунок 76. Тест 9. След расчёта: выход 1 закрыт на первой секунде, человек успевает пройти к нему 0,34 м, разворачивается и уходит к выходу 2 за 14,88 с. Пунктир – контрольный расчёт при открытом выходе 1

ТЕСТ 10. СКОПЛЕНИЕ ПЕРЕД ЛЕСТНИЦЕЙ

Проверяется, что на пути с последовательно сужающимися элементами скопления выстраиваются в цепочку. Сто пятьдесят агентов. Ожидание стандарта ISO 20414 качественное: цепочку создаёт различие предельных потоков двери 1,0 м, коридора 2,0 м и входа на лестницу 1,2 м.

Таблица 37. Тест 10, критерий и результат

Критерий ISO 20414	Результат при базовой конфигурации	Состояние
Скопление у двери, установившийся поток в коридоре, скопление у марша [5, тест 10]	Картина одинакова во всех пяти расчётах: у двери комнаты плотность до 9,2…11,4 чел/м² (средняя 4,5…4,7), в середине коридора установившиеся 0,45…0,50, перед входом на лестницу 0,82…0,90 чел/м² – в 1,8 раза выше, чем в коридоре; удельный поток через вход на лестницу 1,00…1,11 чел/(с·м). На марше устойчивого скопления нет: среднее время в скоплении там 0,00 с против 48…53 с у двери	пройден

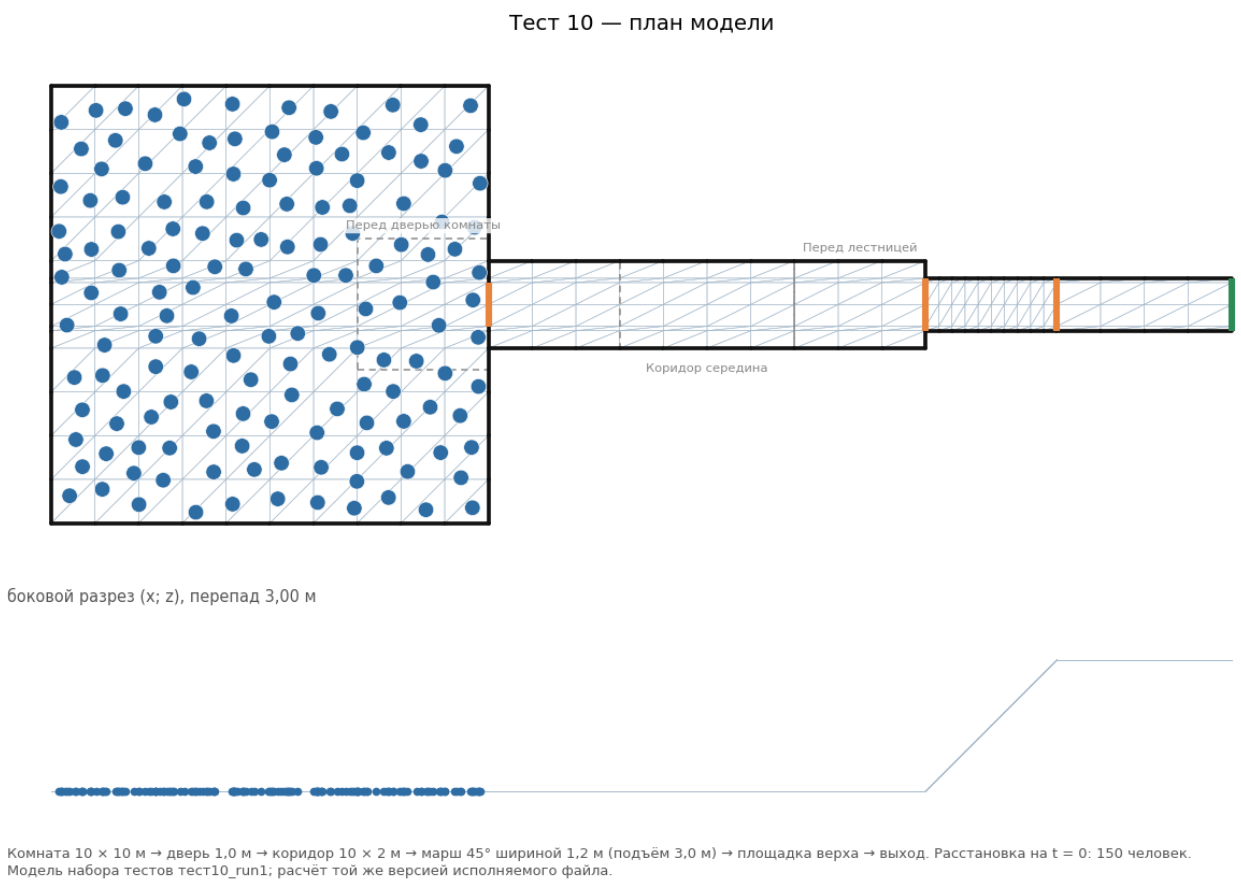


Рисунок 77. Тест 10. План модели: комната 10 × 10 м, дверь 1,0 м, коридор 10 × 2 м, марш 1,2 м

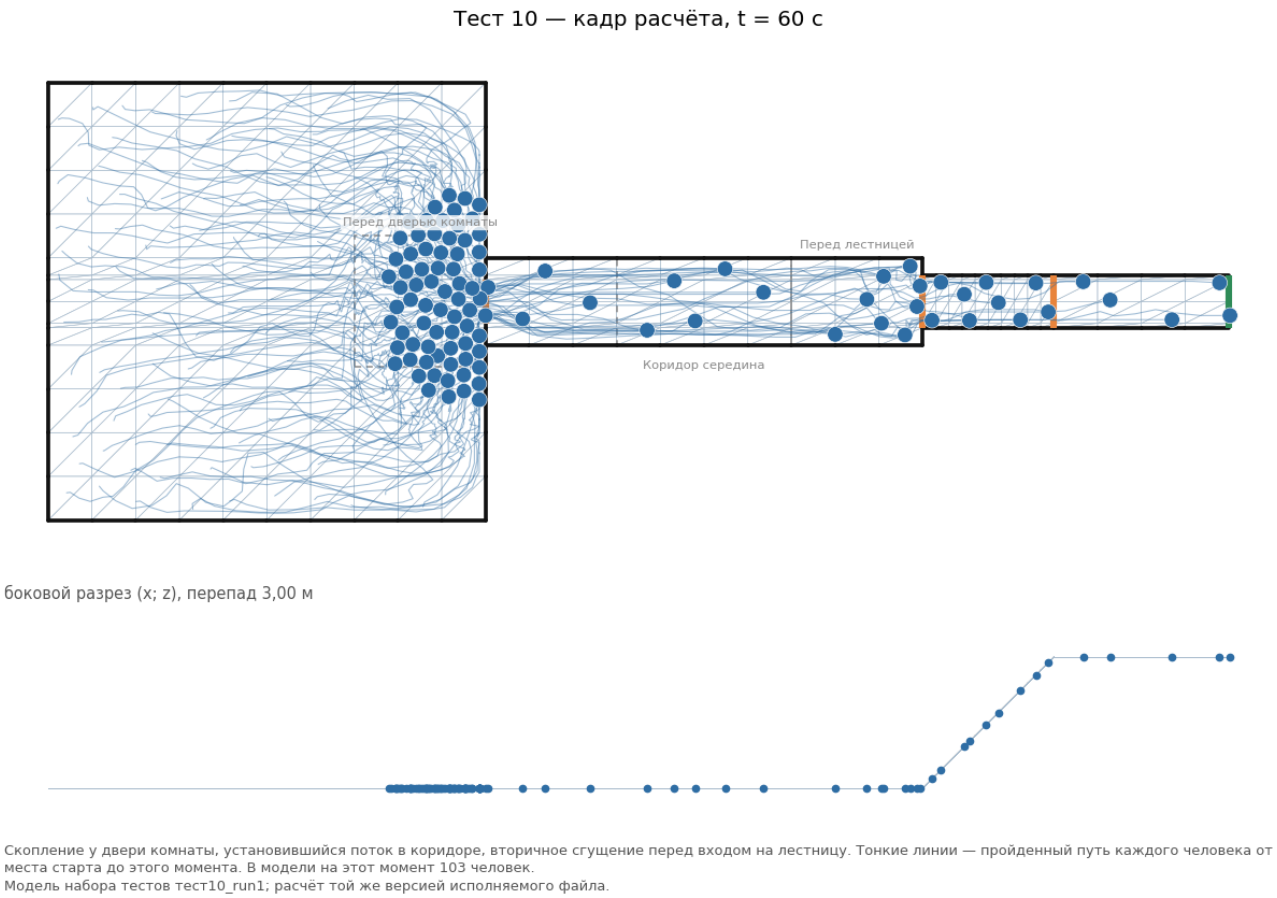


Рисунок 78. Тест 10. Кадр расчёта на 60-й секунде: тонкие линии показывают пройденный путь каждого человека, видны скопление у двери и сгущение перед лестницей

ТЕСТ 11. НАИБОЛЬШИЙ ПОТОК ЧЕРЕЗ ПРОЁМ

Проверяется, что удельный поток через створ не превышает заданного модели предела. Сто агентов. Порог задаётся при постановке проверки, значение 1,33 чел/(с·м) [6] стандарт ISO 20414 приводит как пример.

Таблица 38. Тест 11, критерий и результат

Критерий ISO 20414	Результат при базовой конфигурации	Состояние
Поток за весь период не выше заданного максимума [5, тест 11]	Предел в модели – 1,42 чел/(с·м); поток за весь период 1,37…1,41 чел/(с·м) по пяти расчётам, **предел не превышен ни в одном** (−0,7 % в максимуме, в допуске ±10 %). Порог 1,33 чел/(с·м) превышен во всех пяти расчётах на +3,0…+6,0 %	пройден

В откалиброванной конфигурации, заданной в блоке Г1.2 режимом УАМ, на той же модели удельный поток составляет 1,03…1,04 чел/(с·м). Заданный предел равен 1,042 чел/(с·м), отклонение −0,2 % в допуске ±10 %. Расчётное время выхода последнего человека больше, чем при базовой конфигурации: 96…97 с против 71…73 с (+32…+35 %). Если предел потока проёма не задавать вовсе, поток через тот же створ вырастает до 2,11…2,26 чел/(с·м): его величину определяет параметр модели, а не геометрия створа.

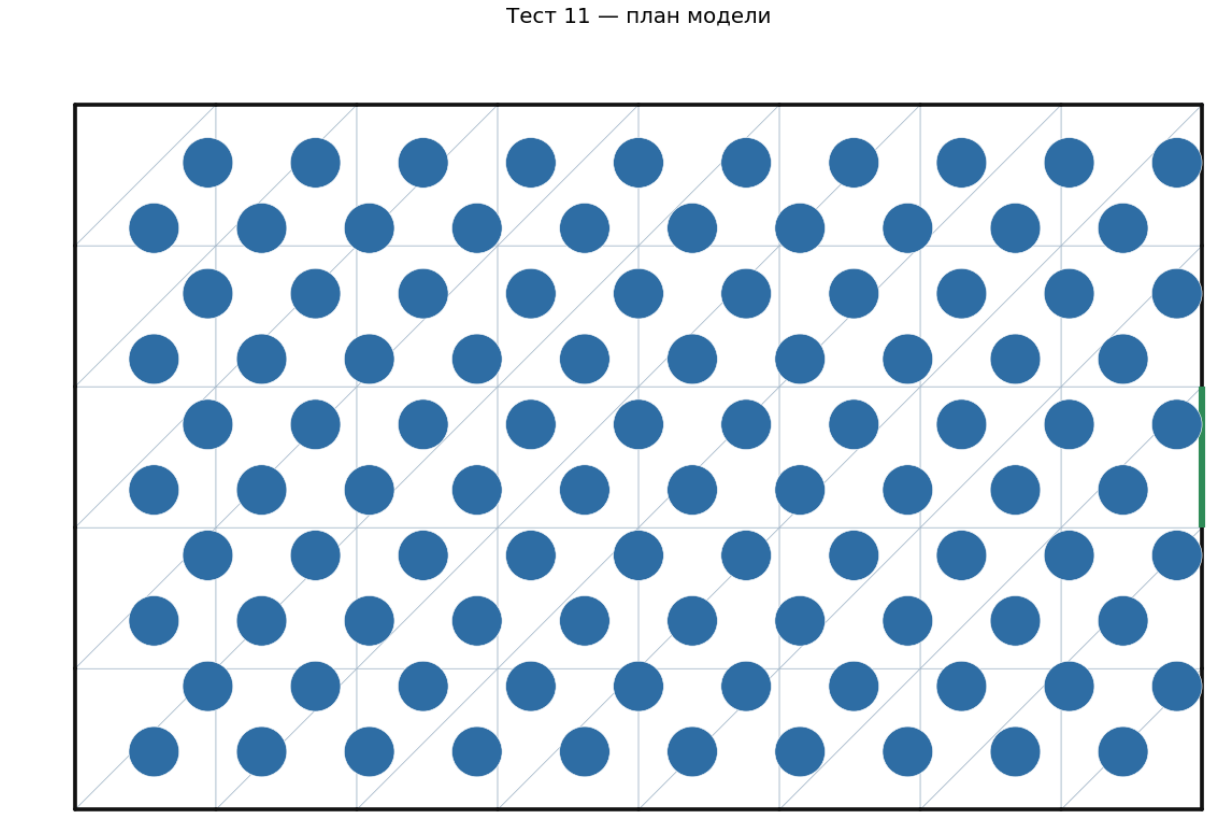
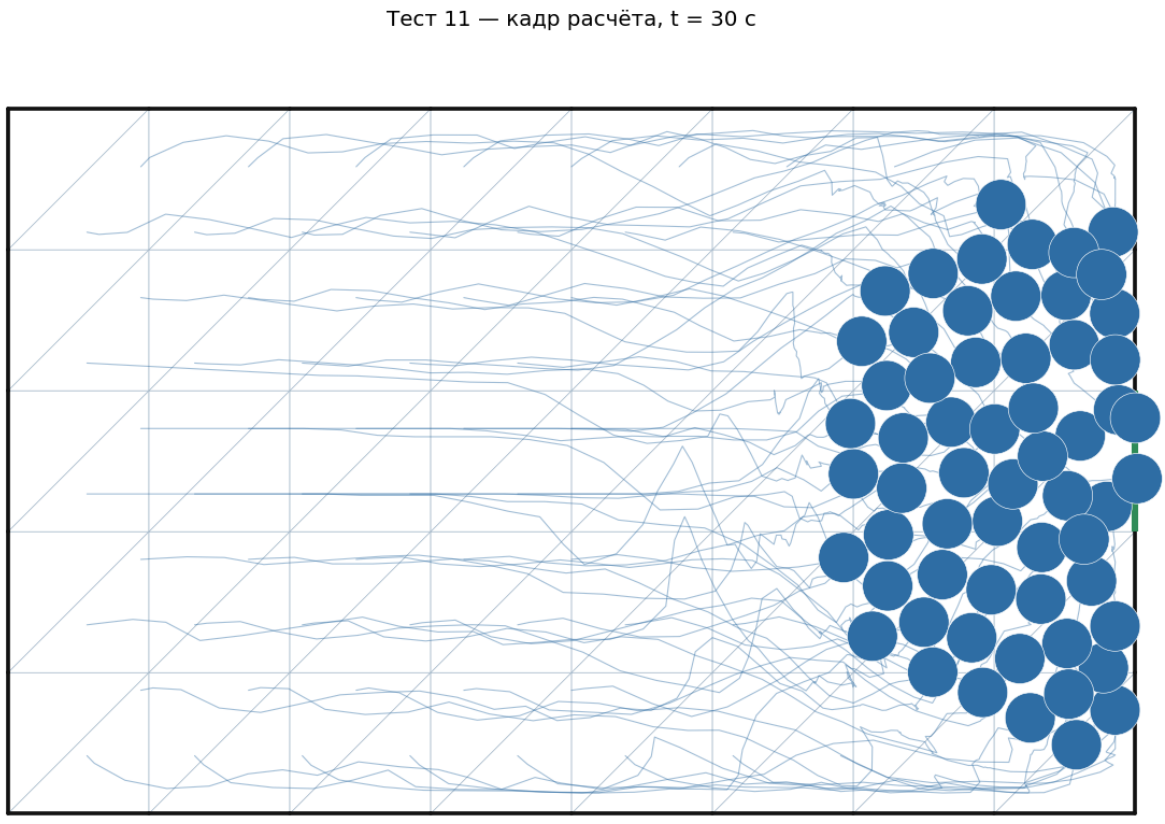
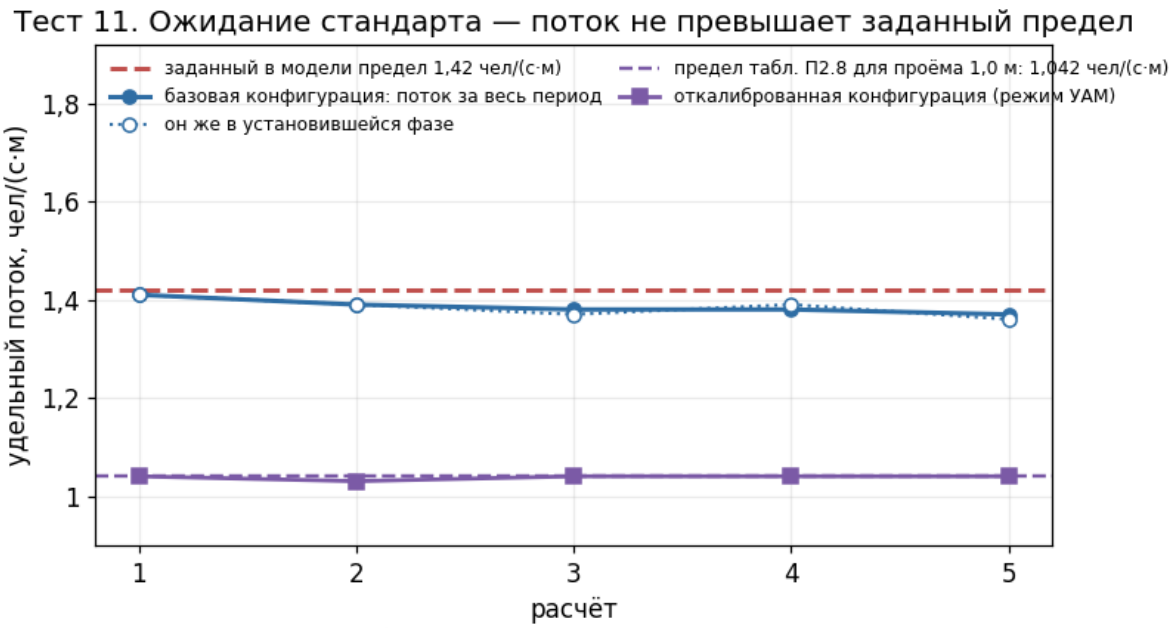


Рисунок 79. Тест 11. План модели: плита 8 × 5 м, проём 1,0 м, 100 человек



Очередь перед проёмом 1,0 м: поток через створ задаёт предел потока проёма. Тонкие линии — пройденный путь каждого человека от места старта до этого момента.
В модели на этот момент 60 человек.
Модель набора тестов тест11_кап1.42_run1; расчёт той же версией исполняемого файла.

Рисунок 80. Тест 11. Кадр расчёта на 30-й секунде: очередь перед створом, тонкие линии показывают пройденный путь каждого человека



Источник: результаты/тест11.csv; откалиброванная конфигурация — расчёт тех же моделей при включённом режиме УАМ.

Рисунок 81. Тест 11. Удельный поток через проём 1,0 м по пяти расчётам: базовая конфигурация при пределе 1,42 чел/(с·м). Откалиброванная конфигурация в режиме УАМ при пределе 1,042 чел/(с·м). По оси ординат удельный поток, чел/(с·м), горизонтали показывают оба предела

Стандарт ISO 20414 требует показать чувствительность к интервалу осреднения. Наибольшее значение по пяти расчётам составляет 1,60 чел/(с·м) при осреднении по 10 с, 1,80 при 5 с и 3,00 при 1 с. С нормативными порогами сопоставим поток за весь период или за установившуюся фазу.

ТЕСТ 12. ПОТОКИ ПО ЛЕСТНИЦЕ

Проверяется, что пропускная способность марша растёт с его шириной. Сто агентов, вниз и вверх, по три расчёта на лестничную клетку. Двери площадок без ограничения потока, чтобы поток определялся маршем.

Таблица 39. Тест 12, критерий и результат

Критерий ISO 20414	Результат при базовой конфигурации	Состояние
Росту ширины марша отвечает рост потока [5, тест 12]	Рост монотонный в обоих направлениях на всех пяти ступенях: вниз 1,42 → 1,68 → 1,97 → 2,21 → 2,42 чел/с, вверх 1,60 → 1,83 → 2,26 → 2,68 → 3,06; время выхода последнего убывает так же монотонно (вниз 89,8 → 67,7 с, вверх 87,0 → 66,8 с). Удельный поток 1,34…1,42 чел/(с·м) вниз и 1,53…1,70 вверх	пройден

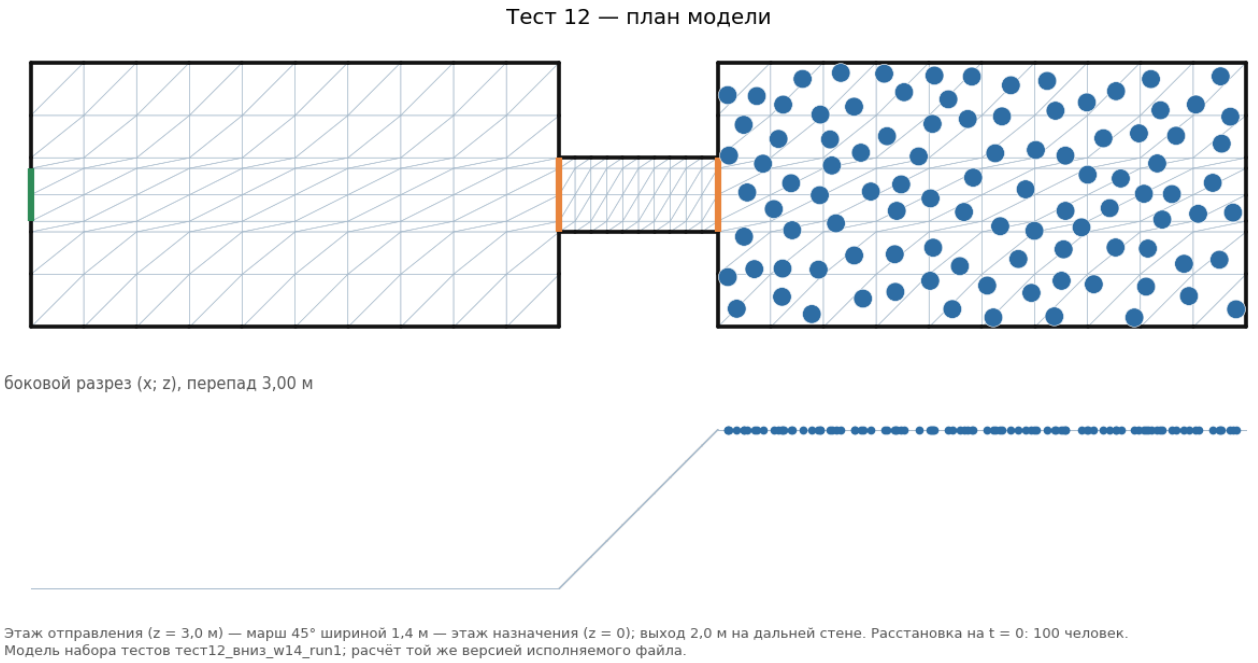


Рисунок 82. Тест 12. План модели: два этажа с перепадом 3,00 м, марш 45° шириной 1,0…1,8 м

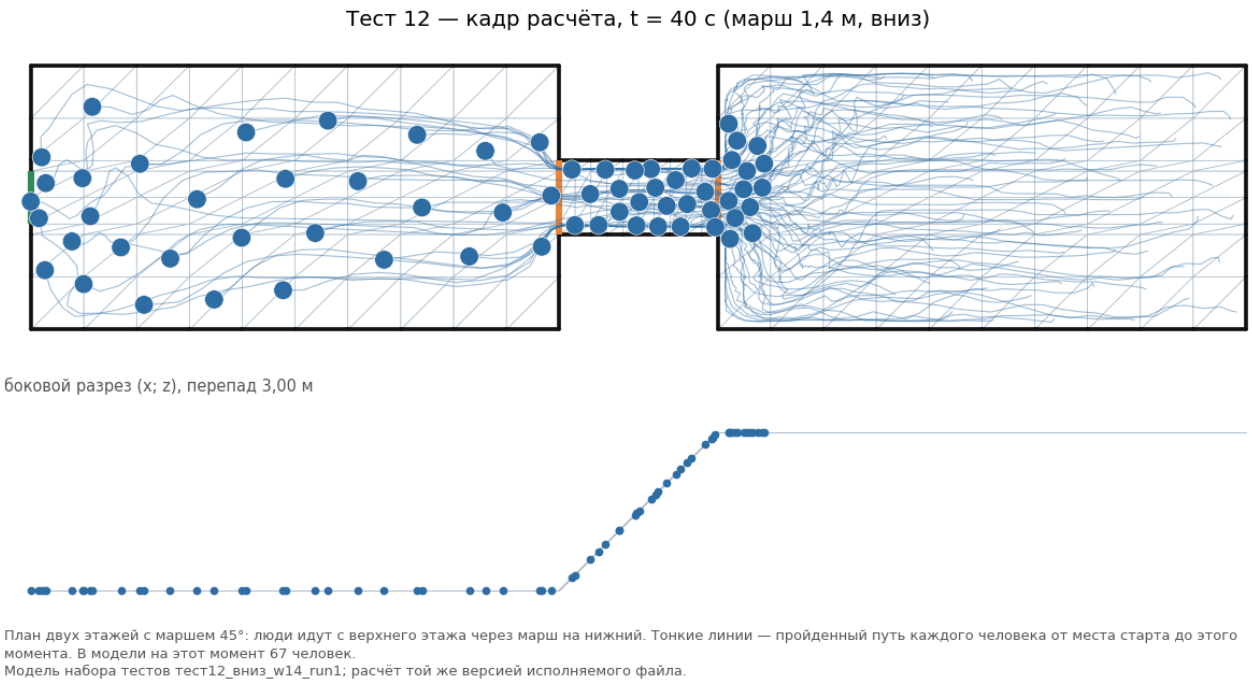
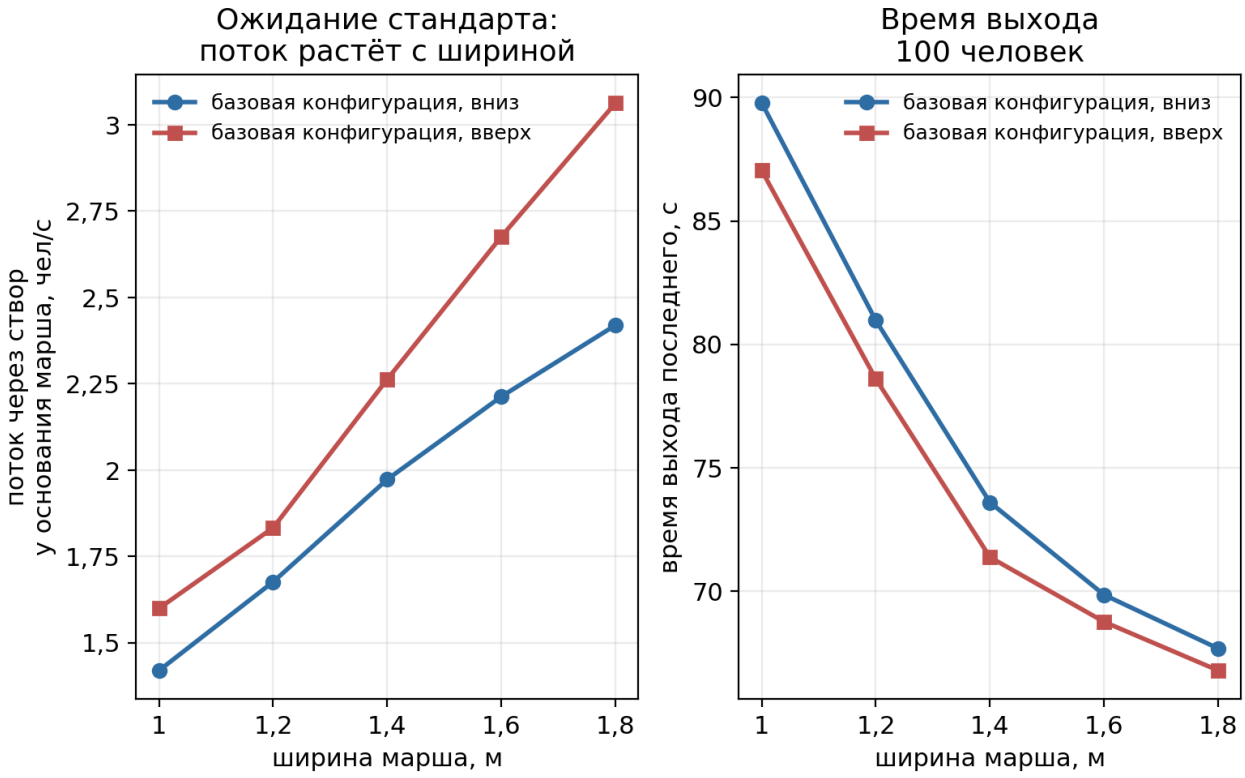


Рисунок 83. Тест 12. Кадр расчёта на 40-й секунде (марш 1,4 м, вниз) в плане и в разрезе; тонкие линии показывают пройденный путь каждого человека



Источник: руководство/данные/тест12.csv, по 3 расчёта на клетку.

Рисунок 84. Тест 12. Поток у основания марша и время выхода последнего человека по его ширине при базовой конфигурации. По оси абсцисс ширина, м, по оси ординат поток, чел/с, и время, с

ТЕСТ 13. СВЯЗЬ ПОТОКА, ПЛОТНОСТИ И СКОРОСТИ В КОРИДОРЕ

Проверяется, что в коридоре расчётные точки отвечают кривой «скорость–плотность», поданной модели на входе. Шестьдесят / 120 / 240 / 360 / 480 человек дают плотность расстановки 0,5…4,0 чел/м². Ограничение потока на выходе не задано. В средней зоне замеряются плотность, скорость и поток.

Таблица 40. Тест 13, критерий и результат

Критерий ISO 20414	Результат при базовой конфигурации	Состояние
Замеры в зоне 2 отвечают допущениям модели [5, тест 13]	D = 0,47 / 1,04 / 1,99 / 2,88 / 3,89 чел/м², V = 0,93 / 0,76 / 0,60 / 0,50 / 0,41 м/с, удельный поток 0,43 / 0,78 / 1,20 / 1,44 / 1,60 чел/(с·м) при заданной кривой V = 1,00 / 0,79 / 0,60 / 0,49 / 0,41 м/с и удельном потоке 0,47 / 0,82 / 1,20 / 1,40 / 1,59 чел/(с·м). Отклонение от заданной кривой **−7,0…+2,0 %** по скорости и −8,5…+2,9 % по потоку, при плотности 2…4 чел/м² – не более 3 %	пройден

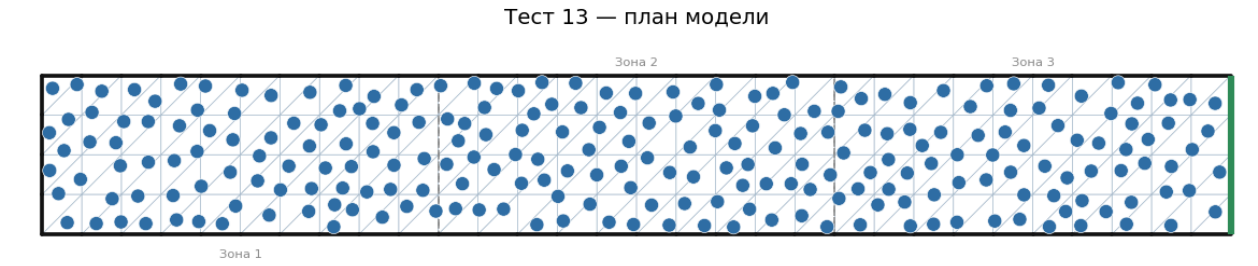


Рисунок 85. Тест 13. План модели: 30 × 4 м, три зоны по 10 м, выход 4,0 м без ограничения потока; расстановка 240 человек на нулевой секунде

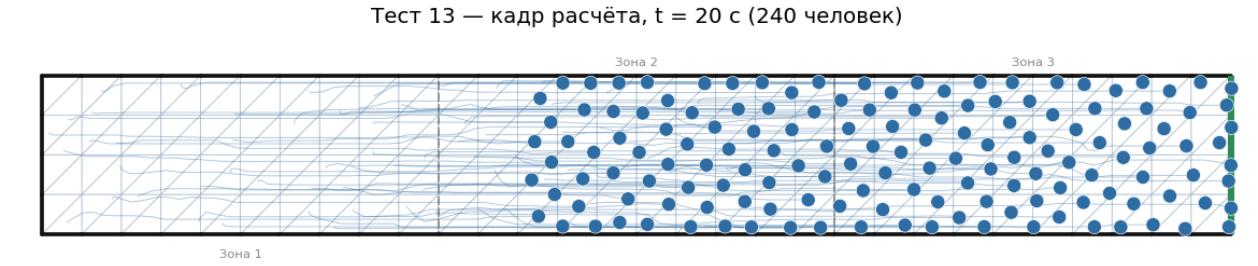
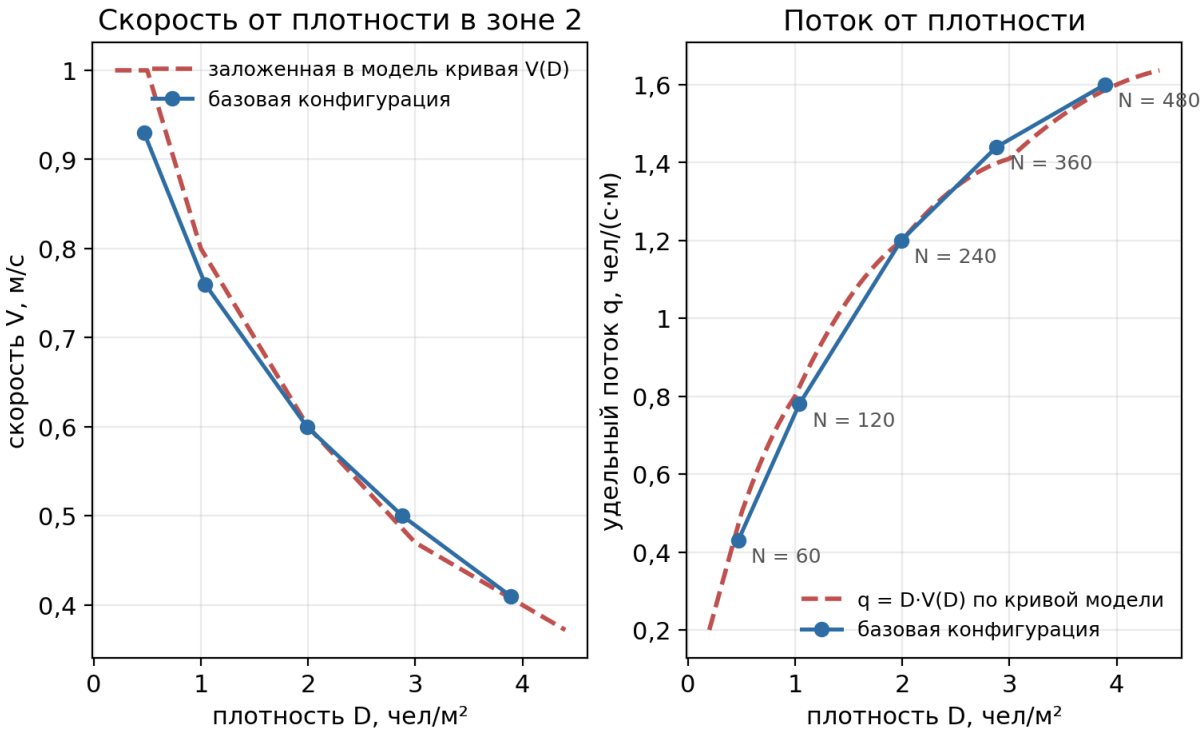


Рисунок 86. Тест 13. Кадр расчёта на 20-й секунде при 240 людях. Штриховой рамкой показана область замера, тонкие линии – пройденный путь каждого второго человека



Источник: результаты/тест13.csv; кривая — та, что задана профилю теста (V_0 = 1,0 м/с).

Рисунок 87. Тест 13. Скорость и удельный поток от плотности при базовой конфигурации: заданная модели кривая и расчётные точки. По оси абсцисс плотность, чел/м², по оси ординат скорость, м/с, и удельный поток, чел/(с·м)

Оценка скорости по времени прохода створов A → B даёт 1,00 / 0,79 / 0,62 / 0,51 / 0,41 м/с. Мгновенные ряды с шагом 0,1 с сохранены, и диаграмма пересчитывается с любым интервалом осреднения, поэтому требование стандарта ISO 20414 выполнено.

ТЕСТ 17. ВЫБОР МАРШРУТА ПО ГЕОМЕТРИИ

Проверяется, что при двух путях к выходу человек выбирает тот, который отвечает заложенному в программу правилу. Два маршрута одинаковой протяжённости по x. Скорость на марше равна горизонтальной, чтобы стоимость пути была пропорциональна длине.

Таблица 41. Тест 17, критерий и результат

Критерий ISO 20414	Результат при базовой конфигурации	Состояние
Путь отвечает заложенному алгоритму выбора маршрута [5, тест 17]	Выбранный маршрут отвечает алгоритму во всех трёх вариантах геометрии: при смещении 2 м верхний путь 25,50 м против нижнего 25,99 м – выбран верхний; при 4 м 29,50 против 25,99 и при 6 м 33,50 против 25,99 – выбран нижний. Маршрут командой сценария не назначался	пройден

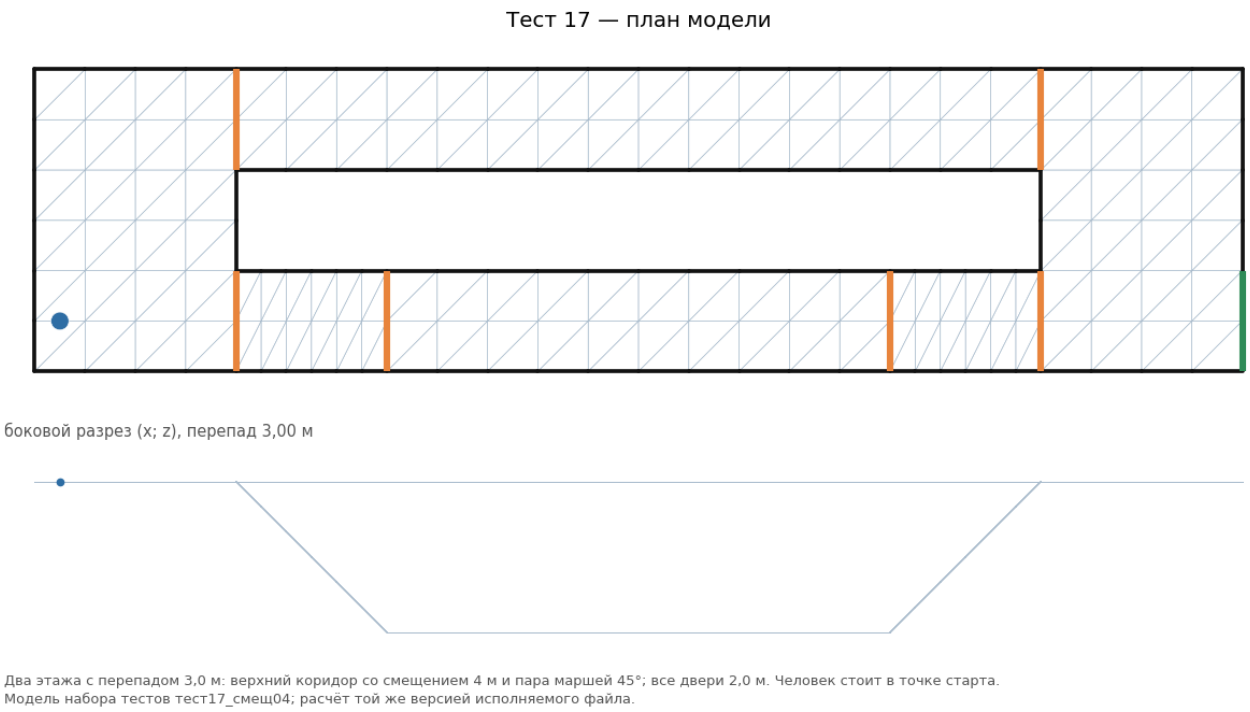


Рисунок 88. Тест 17. План модели: верхний коридор со смещением 2 / 4 / 6 м и пара маршей 45°

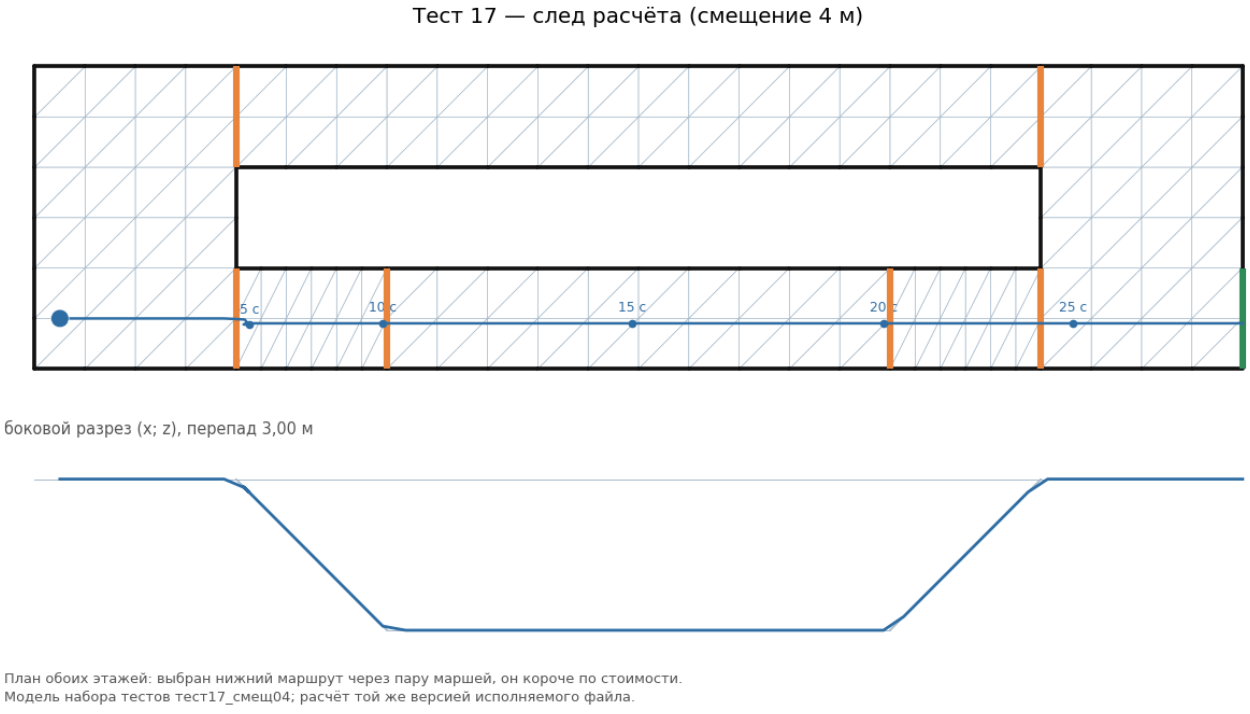


Рисунок 89. Тест 17. След расчёта при смещении 4 м: выбран нижний маршрут

АНАЛИЗ РЕЗУЛЬТАТОВ

Все четырнадцать тестов пройдены. Отклонение или мера совпадения по каждому приведены в таблице своего теста.

Числовой эталон времени задан в тестах 2 и 3, это пять сравнений с отклонением −0,10…+0,73 с (−1,0…+1,8 %). Все они **в допуске ±10 %**, как и одиннадцать сравнений по скорости и удельному потоку с зависимостью, заданной тестом (тесты 11 и 13): −8,5…+2,9 %. При откалиброванной конфигурации в

допуске оказалось единственное сравнение теста 11, удельный поток при пределе режима УАМ (−0,2 %). В остальных двенадцати тестах числового эталона нет: критерий стандарта ISO 20414 качественный либо задаёт монотонность, разницу двух расчётов или непревышение предела, и доля в допуске для них не определяется.

При линейном наборе скорости за τ = 1,5 с потеря равна $\tau/2$ = 0,75 с на каждом старте, и это свойство модели движения, а не погрешность. Этим объясняются +0,7 с в тесте 2, где путь короткий. Тем же вызвано снижение скорости на 7…9 % при плотности 0,5 чел/м² в тесте 13, где старт происходит внутри зоны замера. При плотности 2 чел/м² и выше вклад разгона не проявляется.

Скорость свободного движения и время начала эвакуации формируются методом обратной функции по собственному начальному числу человека, поэтому выборка не выходит за область определения кривой (тесты 1 и 5). Начальные числа расчётов требуется разносить. Поток через створ (кроме предела проёма), сопротивление встречному движению и образование скопления в ядре не задаются числом. Тесты 4, 6, 10 и 12 измеряют величины, определяемые геометрией, рулевым управлением и кривой «скорость–плотность», и стандарт ISO 20414 проверяет в них направление и монотонность.

Предел потока проёма действует на мгновенное значение, поэтому за весь период удельный поток ниже предела (тест 11). Расстояние до стен ограничивает проходной диаметр. Промежуток между людьми ограничивает диаметр проекции. В тесте 4 траектории проверяются по 0,140 м.

Параметры человека здесь задаёт стандарт ISO 20414, и этим приложение отличается от расчёта пожарного риска: V_0 = 1,00 м/с вместо 100 м/мин и кривые распределения скоростей [39] взамен единой. Числа приложения проверяют расчётный метод и на расчёт по методике не переносятся.

Г1.4 Выводы

Ядро проходит все проведённые тесты протокола ISO 20414: качественные критерии исполнены, а тесты с числовым эталоном выполнены в допуске документа. При базовой конфигурации расчётное время прохода коридора и марша отличается от аналитического значения в пределах допуска: оно меньше эталона при разгоне, стремящемся к нулю, и на марше вниз, совпадает с ним при подъёме, а оценку сверху даёт тест с разгоном по профилю. Скорость и удельный поток отличаются от поданной зависимости в пределах допуска; наибольшие отклонения относятся к малой плотности, где в замер попадает разгон. При откалиброванной конфигурации в режиме УАМ удельный поток через проём совпадает с пределом, вычисленным по [1, табл. П2.8], и расчётное время выхода через проём возрастает. Ограничение применения: в рассмотренных постановках параметры человека заданы стандартом ISO 20414, а не методикой [1], поэтому результаты характеризуют расчётный метод и на расчёт пожарного риска не переносятся. В ядре нет компонентов дыма, потери дееспособности, лифтов, группового движения, социального влияния и привязанности к выходу.

Приложение Г2. Базовые зависимости методики № 1140

Г2.1 Источник и данные

Методика определения расчётных величин пожарного риска [1] задаёт движение людей зависимостями приложения № 2. Скорость свободного движения дана в табл. П2.6, П2.7 и П2.9, её снижение с ростом плотности задаёт формула (П2.1). Площадь и габариты проекции человека заданы п. 10 и табл. П2.5. Интенсивность потока определяют формулы (П2.2–П2.4), а её предельные значения приведены в табл. П2.8. Эти зависимости восходят к [2;7;8;9;11]. Приложение отвечает на вопрос, точно ли ядро воспроизводит сами эти величины: любое отклонение в них переносится на все дальнейшие расчёты. Сравнение ведётся с таблицей или формулой методики, а допуск принят по правилам верификации, ±10 %. Для табличных скоростей приведена и более строгая оценка ±2 %, отвечающая округлению скорости в библиотеке профилей.

Таблица 42. Шесть постановок приложения

Величина методики	Где в методике	Допуск	Что измеряется в модели
Скорость свободного движения V_0 по видам пути	[1, табл. П2.6, П2.7, П2.9]	±10 %; для сведения – ±2 %	скорость одного человека каждого профиля по разности путей и времён на двух длинах горизонтали и марша
Порог свободного движения D_0 и кривая «скорость–плотность» V(D)	[1, формула П2.1, табл. П2.6, П2.7]	±10 %	табулированная кривая профиля, которая подаётся в расчёт, против непрерывной формулы
Площадь и габариты проекции, проходимость узких мест	[1, п. 10 прил. № 2, табл. П2.5]	±10 %	диаметр равновеликого круга и проходной диаметр; наименьшая ширина проёма, через которую проходит проекция
Предел интенсивности через проём q_{Dmax}	[1, табл. П2.8]	±10 %	удельный поток через проём в установившейся фазе на шести ширинах
Кривая V(D) в расчёте: где воспроизводится и где скорость задаёт проём	[1, формула П2.1]	±10 %	плотность и скорость в области замера при пяти постановках движения
Предельные интенсивности по видам пути q_{max}	[1, табл. П2.8]	±10 %	удельный поток через дверь, марш и коридор шириной 0,7…3,0 м

Обозначения ширин: **b** относится к проёму (створу), $\mathbf{b_{кор}}$ – к коридору, в котором образуется очередь перед проёмом.

Постановка и критерий приёмки заданы нормативным документом, поэтому данные полны по построению. Восполнены только единицы измерения и округления.

Таблица 43. Что взято из методики и что при этом пересчитано или округлено

Что взято	Откуда	Что задаёт в модели	Пересчёт или округление
Формула V(D) и порог D_0	[1, формула П2.1]	кривая «скорость–плотность» каждого профиля по видам пути	табулирование 11 узлами с линейной интерполяцией; узел порога стоит на 0,50 вместо 0,51 чел/м² – порог ниже табличного на 2 %
Формулы интенсивности	[1, формулы (П2.2)–(П2.4)]	связь плотности, скорости и интенсивности	перевод единиц: q [м/мин] = J [чел/(с·м)] · 60 · f при f = 0,1 м²
Габариты и площадь проекции	[1, п. 10 прил. № 2, табл. П2.5]	форма профиля: диаметр равновеликого круга и проходной диаметр	эллипс 0,28 × 0,46 м представлен равновеликим кругом Ø 0,357 м (раздел 2.2); проходной диаметр 0,28 м равен малой оси эллипса
V_0 и коэффициент a по видам пути	[1, табл. П2.6, П2.7; П2.9 для транспортируемых на носилках]	скорость свободного движения и крутизна кривой	скорость в библиотеке профилей округлена до сотых метра в секунду – отсюда более строгая оценка ±2 %
Предельные интенсивности	[1, табл. П2.8]	предел потока проёма и значения для сопоставления по видам пути	q_{Dmax} дверного проёма переведена в предел потока проёма, чел/(с·м)
Правило «пути и выходы шириной менее 0,7 м не учитываются»	[1, п. 7 прил. № 5]	–	ядром не контролируется, остаётся правилом построения расчётной схемы (Г2.3)

Г2.2 Расчётная модель и конфигурации расчёта

Постановки приложения – простые модели, в каждой из которых измеряется одна величина методики. Общие параметры всех расчётов сведены в таблицу.

Таблица 44. Общие параметры расчётов приложения

Параметр	Значение
Профиль	М0-3 (летняя одежда) [1, табл. П2.6]; в замерах скорости и габаритов – все 27 профилей библиотеки
Время начала эвакуации, время разгона	0; 1,5 с, кресло-коляска – 3,0 с
Расстановка	гексагональная и случайная; плотность расстановки $D_{расст}$ от 0,5 до 8 чел/м²; в постановках с очередью – по три начальных числа расстановки на точку
Число расчётов	240 расчётов и 5 встроенных замеров; 55 моделей потоков через элементы пути; 20 моделей свободного пакета, коридора после проёма и очереди; 9 моделей открытого коридора

Плотность измеряется двумя мерами. Мера **по площади** есть число людей на площадь области замера. По этой шкале методики приведены все числа приложения. Локальная плотность **по мере ядра** считается по соседям впереди, и по ней ядро определяет скорость. Удельный поток через проём замеряется в установившейся фазе, между 15 и 85 % прошедших. Две геометрии сверх перечисленных на планах показаны кадрами расчёта в Г2.3. Первая содержит коридор 3 × 50 м с примыкающим помещением 10 × 5 м на 200 человек, проёмом b и коридором 3 × 30 м, где последовательно образуются свободный пакет и очередь. Вторая – открытый коридор 2 × 200 м без проёма и без ограничения потока при плотности расстановки 1…5 чел/м².

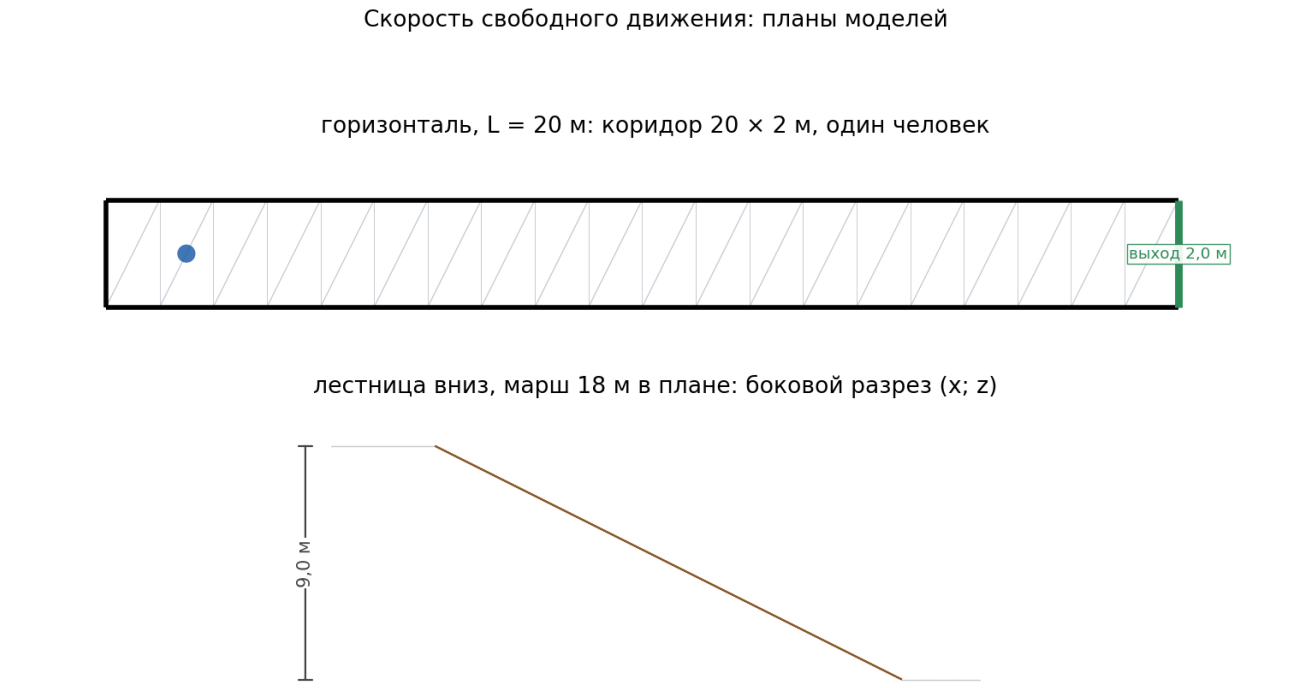


Рисунок 90. Планы моделей замера скорости свободного движения: коридор 20 × 2 м и разрез марша 18 м (подступёнок 0,15 м, проступь 0,30 м)

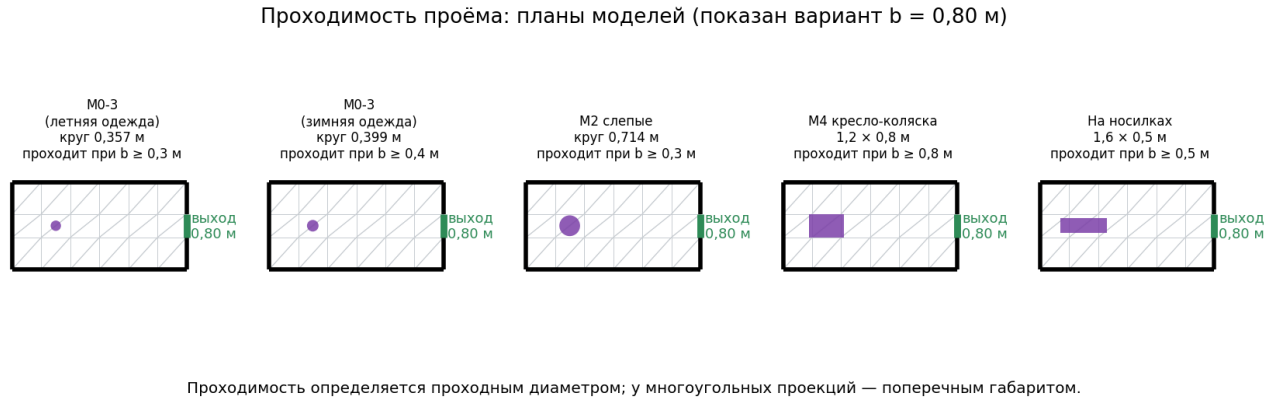


Рисунок 91. Планы моделей проходимости: комната 6 × 3 м, один человек, проём уменьшающейся ширины 0,30…1,20 м. Показана ширина 0,80 м

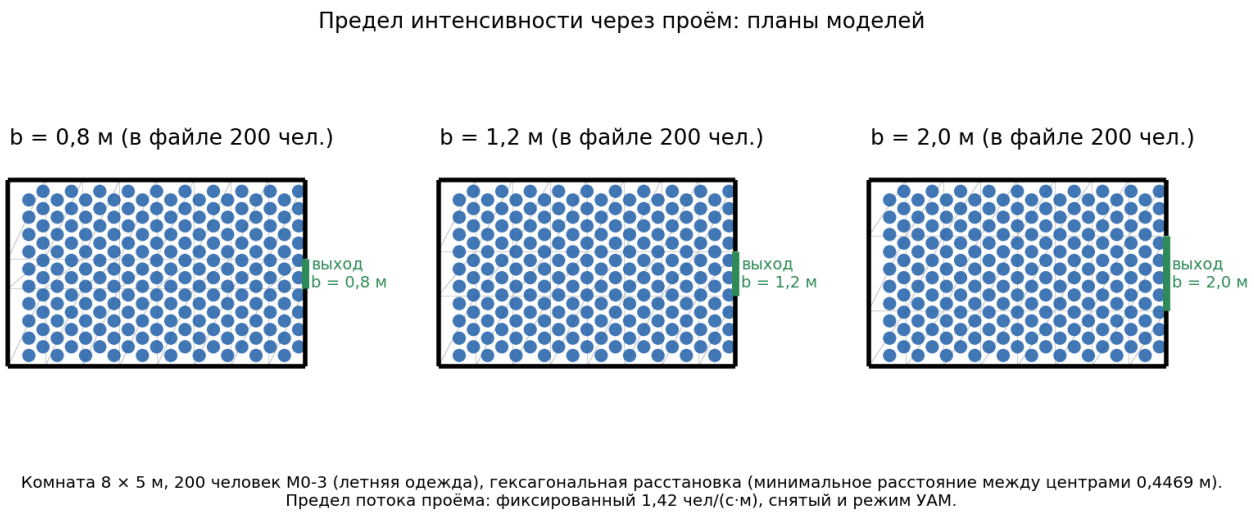


Рисунок 92. План модели предела интенсивности: комната 8 × 5 м, 200 человек профиля M0-3, плотность расстановки 5 чел/м², выход b = 0,8…2,0 м

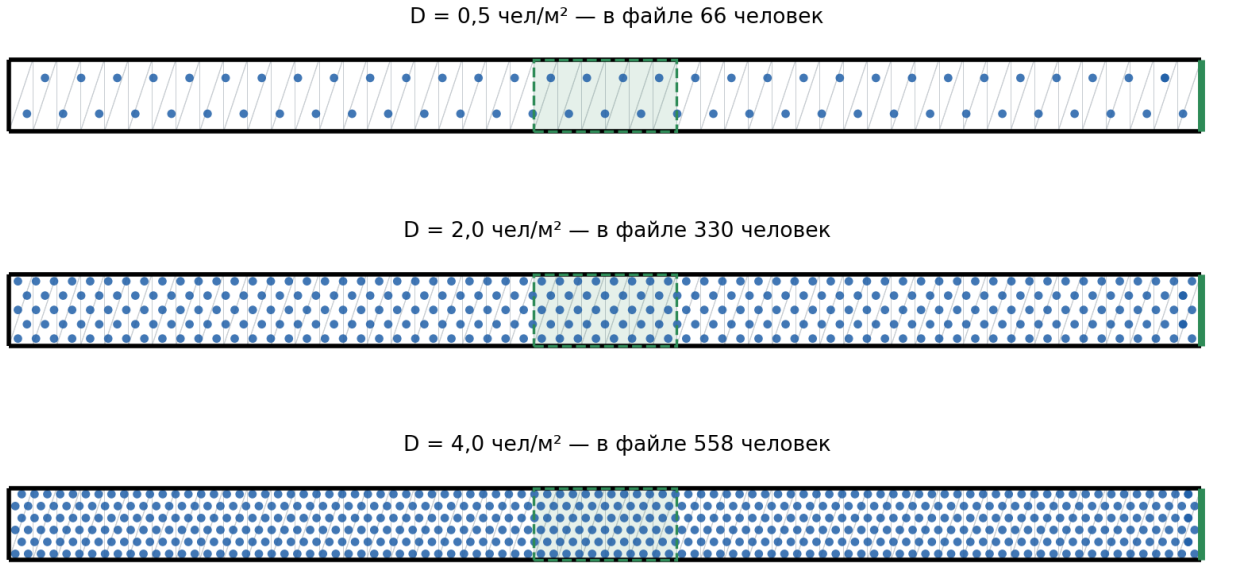


Рисунок 93. Планы моделей кривой «скорость–плотность»: коридор 3 × 50 м, область замера 6 × 3 м посередине, выход во всю ширину торца

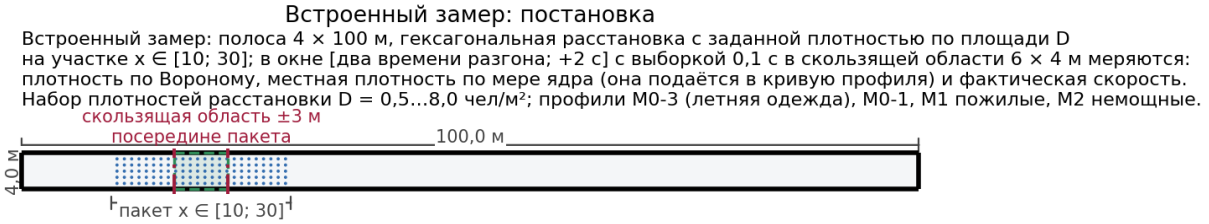


Рисунок 94. План встроенного замера: полоса 4 × 100 м, пакет заданной плотности на участке 10…30 м, скользящая область вокруг его середины

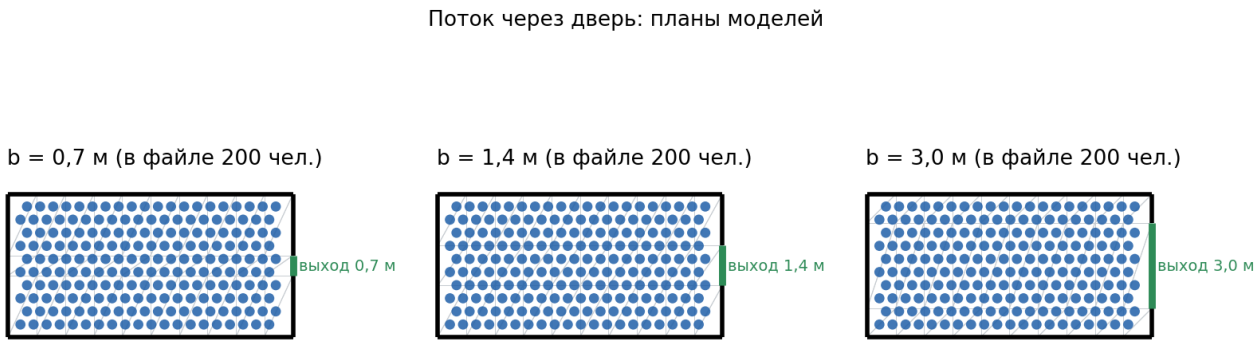


Рисунок 95. Планы моделей потока через двери: помещение 10 × 5 м, 200 человек, дверь шириной 0,7…3,0 м

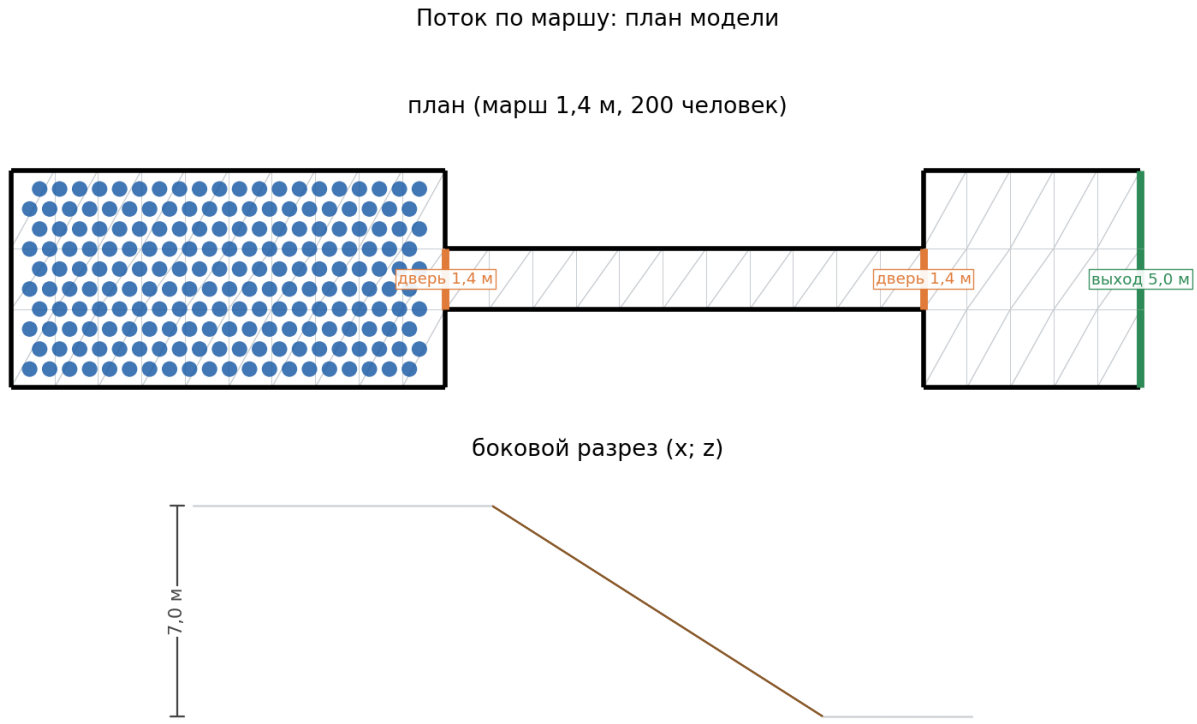


Рисунок 96. План модели потока по маршу: подъём 7 м, заложение 11 м, ширина марша 0,7…3,0 м. Показан марш 1,4 м

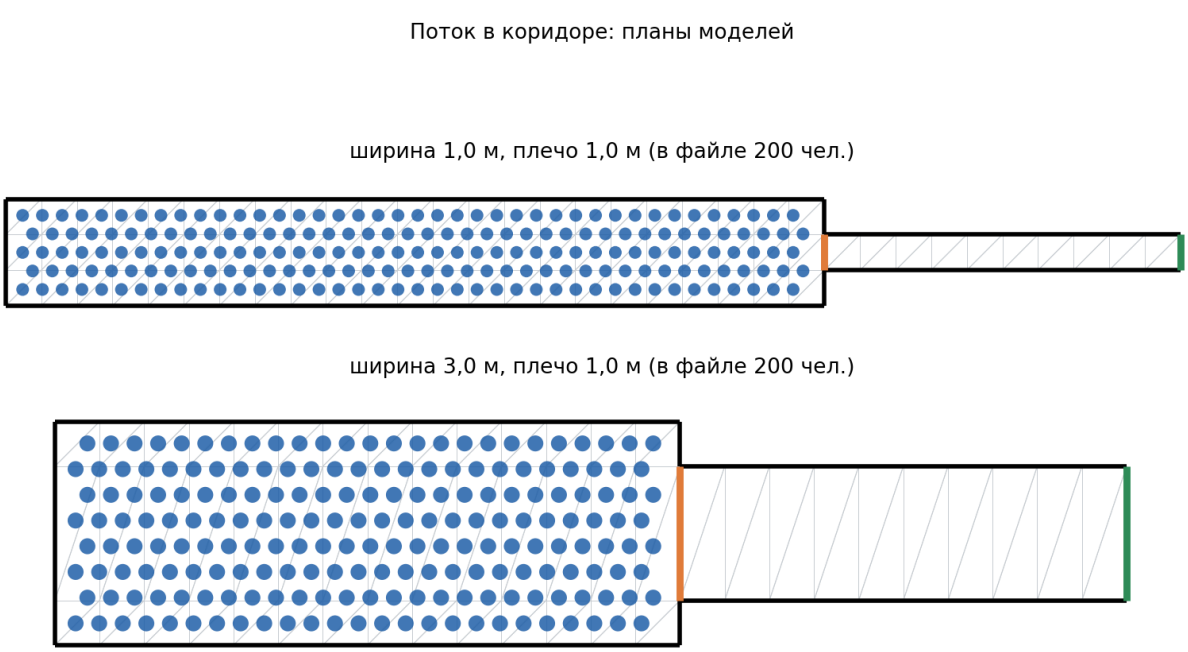


Рисунок 97. Планы моделей потока в коридоре длиной 10 м шириной 0,7…3,0 м с входным плечом 0 / 0,5 / 1,0 / 2,0 м

Откалиброванная конфигурация применена в одной постановке: удельный поток через проём по табл. П2.8. Её эталон есть аналитическая зависимость предела от ширины проёма, и воспроизводит её режим УАМ: предел вычисляется для каждого створа по приложению № 6 методики. Остальные пять постановок от предела потока проёма не зависят и посчитаны при базовой конфигурации. Измеренных в опыте величин ни в одной постановке нет: эталоном служит сама методика, поэтому других замен параметров откалиброванная конфигурация не содержит.

Таблица 45. Конфигурации расчёта

Параметр	Базовая конфигурация	Откалиброванная конфигурация (режим УАМ)	Источник значения
Предел потока проёма	1,42 чел/(с·м) = 8,5 м/мин при f = 0,1 м², одно значение на все ширины	вычисляется по ширине проёма упрощённой аналитической моделью методики	[1, табл. П2.8]: q_{Dmax} дверного проёма 8,5 м/мин при b ⩾ 1,6 м и ветвь 2,5 + 3,75·b при b < 1,6 м; происхождение значения 1,42 – раздел 2.6
Режим УАМ	выключен: предел потока проёма задан значением	включён	устройство переключателя – раздел 2.6
Профиль	М0-3	тот же	[1, табл. П2.6, П2.7]
Кривая «скорость–плотность»	табуляция формулы (П2.1)	та же	[1, формула П2.1]
Проекция и проходной диаметр	круг Ø 0,357 м, проходной диаметр 0,28 м	те же	[1, п. 10 прил. № 2, табл. П2.5]
Время разгона	1,5 с	то же	величины с таким смыслом в методике нет
Где применена	все шесть постановок	удельный поток через проём (табл. П2.8)	–

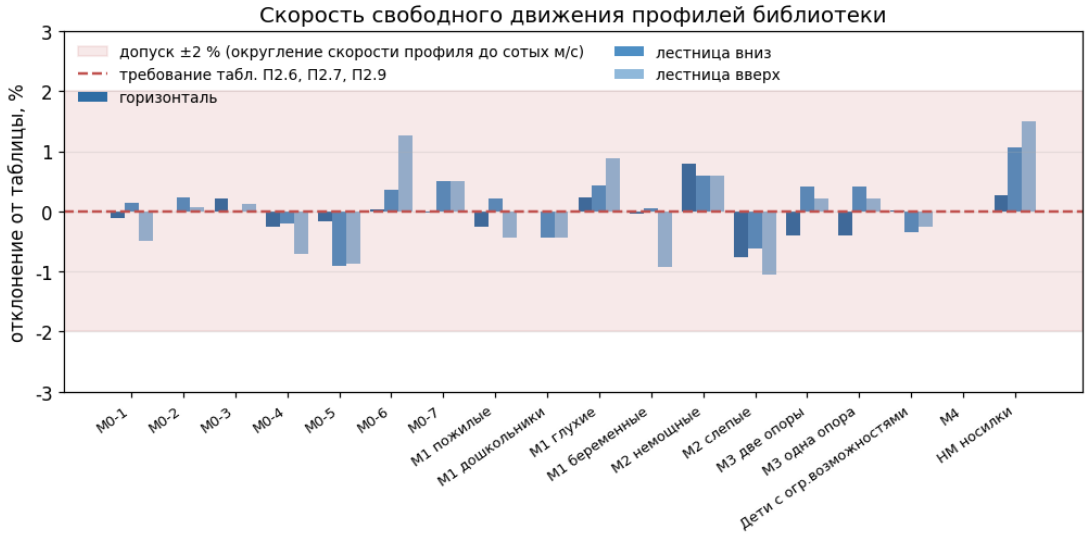
Г2.3 Результаты и анализ

СКОРОСТЬ СВОБОДНОГО ДВИЖЕНИЯ ПО ПРОФИЛЯМ

Проверяется, что человек каждого профиля идёт с той скоростью, которую предписывают таблицы методики, по каждому виду пути.

Таблица 46. Скорость свободного движения, м/мин: требование методики / базовая конфигурация

Профиль	Горизонталь	Лестница вниз	Лестница вверх
М0-1	92,6 / 92,49	92,4 / 92,53	65,9 / 65,58
М0-2	120,0 / 120,00	129,0 / 129,31	76,8 / 76,85
М0-3	**100,0 / 100,21**	**100,0 / 100,00**	**60,0 / 60,07**
М0-4	93,8 / 93,57	93,8 / 93,60	57,5 / 57,09
М0-5	91,4 / 91,25	90,0 / 89,19	56,1 / 55,61
М0-6	69,6 / 69,62	61,7 / 61,92	43,5 / 44,05
М0-7	45,02 / 45,01	30,0 / 30,15	30,0 / 30,15
М1 пожилые	80,0 / 79,80	70,0 / 70,15	60,0 / 59,74
М1 дошкольники	60,0 / 60,00	47,0 / 46,80	47,0 / 46,80
М1 глухие	82,0 / 82,19	82,0 / 82,35	54,0 / 54,48
М1 беременные	56,42 / 56,40	42,35 / 42,37	31,25 / 30,96
М2 немощные	25,0 / 25,20	20,0 / 20,12	20,0 / 20,12
М2 слепые	26,0 / 25,80	21,0 / 20,87	18,0 / 17,81
М3 (одна опора, две опоры)	44,0 / 43,82	24,0 / 24,10	14,0 / 14,03
Дети с ограниченными возможностями	51,0 / 51,01	23,0 / 22,92	20,0 / 19,95
М4 кресло-коляска	60,0 / 60,00	строки нет / 59,96	строки нет / 59,96
Транспортируемые на носилках	70,0 / 70,18	30,0 / 30,32	20,0 / 20,30



Показаны профили без зимних вариантов (они отличаются только площадью проекции) и без специализированных; у кресла-коляски строк «лестница» в табл. П2.7 нет.

Рисунок 98. Отклонение измеренной скорости свободного движения от таблиц методики по трём видам пути при базовой конфигурации. По оси абсцисс профили, по оси ординат проценты. Полоса показывает более строгую оценку ±2 %

Наибольшее отклонение по горизонтали составляет **+0,80 %** у профиля М2 немощные. На марше отклонение равно +1,07 % вниз и +1,50 % вверх у транспортируемых на носилках (табл. П2.9). Все замеры в допуске ±10 % и укладываются в более строгую оценку ±2 %. Отклонения создаёт округление скорости в библиотеке профилей до сотых метра в секунду. На марше скорость выдерживается вдоль наклонной, а не плановой длины, как предписывает п. 10 прил. № 5 методики. Строк «лестница» для кресла-коляски табл. П2.7 не содержит: в расчёте человек этого профиля движется по маршу с горизонтальной скоростью.

ПОРОГ СВОБОДНОГО ДВИЖЕНИЯ И КРИВАЯ ПРОФИЛЯ

Проверяется, что кривая, по которой ядро снижает скорость с ростом плотности, совпадает с формулой (П2.1) методики и что до порога D_0 она остаётся равной скорости свободного движения.

$$V_{Di} = V_{0i} \cdot (1 - a_i \cdot \ln(D_i / D_{0i})) \cdot m \text{ при } D_i > D_{0i};\ V_{Di} = V_{0i} \text{ при } D_i \leqslant D_{0i} \quad (П2.1)$$

Таблица 47. Порог свободного движения и точность табулирования кривой

Требование методики	Базовая конфигурация
При $D \leqslant D_0$ скорость равна скорости свободного движения, без излома; для горизонтали профиля М0-3 D_0 = 0,51 чел/м²	При $D \leqslant$ 0,50 чел/м² скорость равна скорости свободного движения **точно**; узел кривой в библиотеке стоит на 0,50 вместо табличных 0,51, и при 0,50 < D < 0,51 отклонение не превышает 0,1 %
V(D) по формуле (П2.1) с коэффициентами табл. П2.6 и П2.7 для всех профилей и всех видов пути	Табулированные кривые 27 профилей по трём видам пути – 760 узлов; из них 639 точек, где значение формулы не меньше 5 м/мин: **медиана отклонения по модулю 0,64 %, 90-й процентиль 1,88 %, максимум 5,85 %**

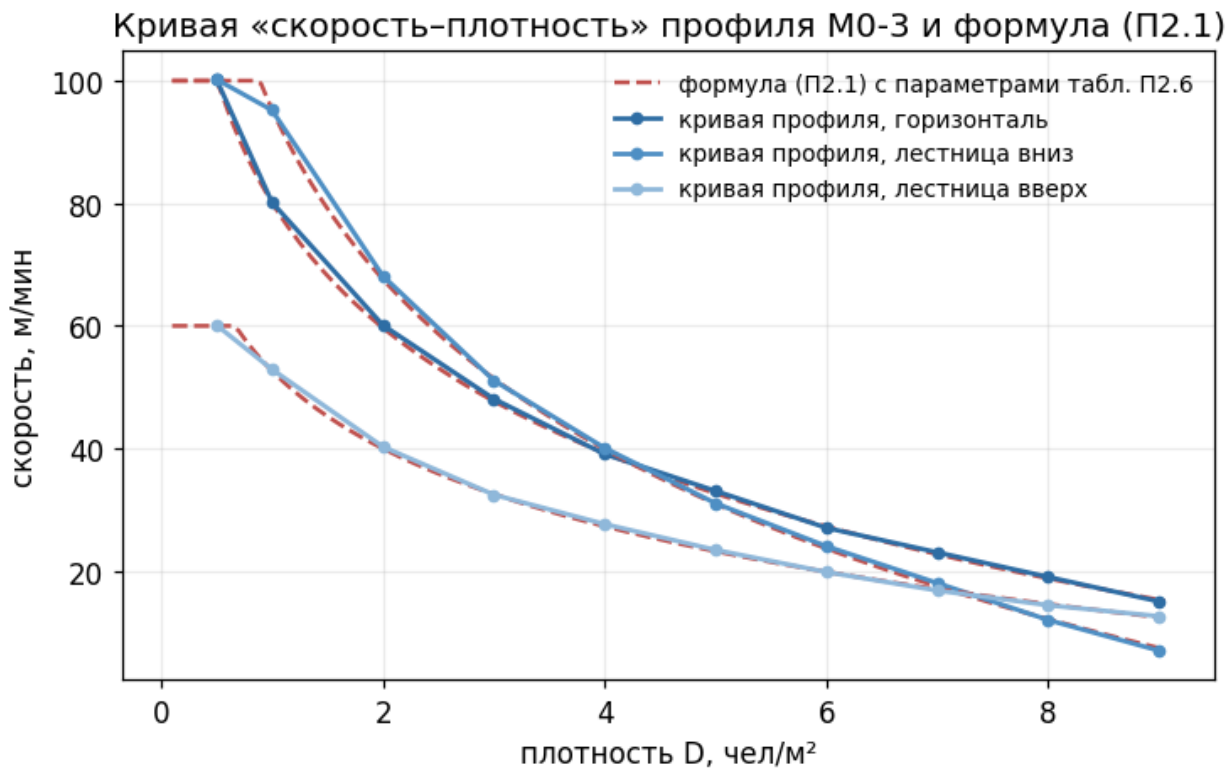


Рисунок 99. Табулированная кривая профиля М0-3 и непрерывная формула (П2.1) для трёх видов пути. Узлы кривой соединены линейно, в таком виде она задана ядру. По оси абсцисс плотность, чел/м², по оси ординат скорость, м/мин

Отклонение табулированной кривой от логарифмической формулы складывается из погрешности хорды между узлами и округления самих узлов. Наибольшее оно на краю диапазона, где кривая круче, и не превышает 5,85 %, что укладывается в допуск ±10 %.

Коэффициент влияния проёма m формулы (П2.1) в ядре не реализован: проём задан геометрией створа и пределом потока. Знак его вклада в расчётное время эвакуации зависит от прочтения методики, поэтому приводится с оговоркой. По буквальному тексту [1] плотность D в формуле выражена в м²/м², m = 1 при D < 0,5 и m = 1,25 − 0,05·D иначе, следовательно m > 1 (при D = 0,5…0,9 м²/м² m = 1,205…1,225): методика скорость в створе повышает, и при неучёте m расчётное время эвакуации больше. В исходной формулировке [8] D выражена в чел/м², и та же запись даёт m ⩽ 1: скорость в створе понижается, а расчётное время эвакуации при неучёте m меньше. В рассмотренных постановках коэффициент не применяется ни в одной.

ГАБАРИТЫ ПРОЕКЦИИ И ПРОХОДИМОСТЬ УЗКИХ МЕСТ

Проверяется, что площадь горизонтальной проекции человека и наименьшая ширина проёма, через которую он проходит, отвечают табл. П2.5 методики.

Таблица 48. Площадь и габариты проекции

Требование методики	Базовая конфигурация
Девять значений площади проекции п. 10 прил. № 2: 0,03 / 0,06 / 0,100 / 0,125 / 0,15 / 0,200 / 0,300 / 0,4 / 0,96 м²	все девять воспроизведены диаметрами профилей с отклонением не более **0,04 %**
Примечание к табл. П2.6: в зимней одежде площадь проекции увеличивается на 25 %	ровно ×1,25 во всех семи парах «летний – зимний» профилей (М0-3: 0,100 → 0,125 м²)
Кресло-коляска 0,80 × 1,20 м, f = 0,96 м² (табл. П2.5)	многоугольник 1,2 × 0,8 м, f = 0,96 м² – совпадает точно
Транспортируемые на носилках 0,50 × 2,10 м, f = 1,05 м² (табл. П2.5)	многоугольник 0,5 × 2,1 м, f = 1,05 м² – совпадает точно

Таблица 49. Проходимость – наименьшая ширина проёма, через которую проходит проекция

Профиль	Проходной диаметр, м	Проходит	Не проходит
М0-3, летняя одежда	0,28	0,30 м и шире	– (проверено до 0,30 м)
М0-3, зимняя одежда	0,313	0,40 м и шире	0,30 м
М2 слепые (проекция Ø 0,714 м)	0,28	0,30 м и шире	–
М4 кресло-коляска	0,456	0,80 м и шире	0,30…0,75 м
Транспортируемые на носилках	0,456	0,50 м и шире	0,30 и 0,40 м

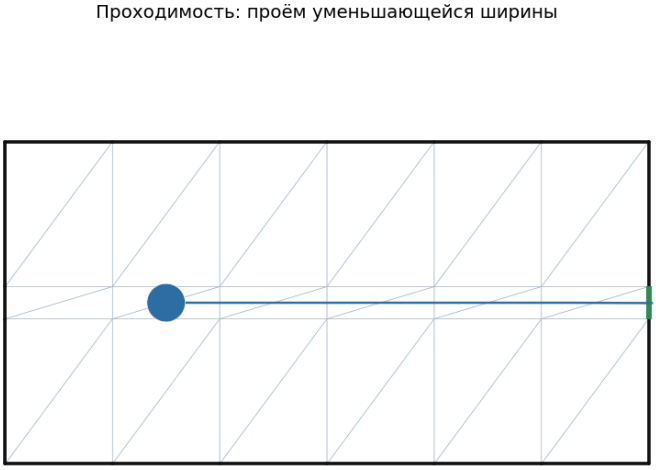


Рисунок 100. Кадр расчёта: человек профиля M0-3 в летней одежде проходит проём 0,30 м. Проекция Ø 0,357 м, проходной диаметр 0,28 м

Площадь проекции методика задаёт эллипсом, а ядро равновеликим кругом: величина совпадает точно, форма же различается. Проходимость определяет проходной диаметр, равный малой оси эллипса табл. П2.5. Правило п. 7 прил. № 5 «пути и выходы шириной менее 0,7 м не учитываются» ядром не контролируется: проёмы 0,60 и 0,65 м в расчёте работают как выход. Соблюдение этого правила остаётся за расчётчиком при построении расчётной схемы.

ПРЕДЕЛ ИНТЕНСИВНОСТИ ЧЕРЕЗ ПРОЁМ

Проверяется главное ограничение методики: интенсивность движения через дверной проём не выше значений табл. П2.8 вне зависимости от типа модели [1, прил. № 2]. Постановка: комната 8 × 5 м, 200 человек профиля M0-3, шесть ширин выхода.

Таблица 50. Предельные интенсивности по видам пути, воспроизведено по [1, табл. П2.8]

Вид пути	**q_{max}, м/мин**	**q_{Dmax} при образовании максимальной плотности, м/мин**
Горизонтальный путь	16,5	13,5
Дверной проём	**19,6**	**8,5 при b ⩾ 1,6 м; 2,5 + 3,75·b при b < 1,6 м**
Лестница вниз	16,0	7,2
Лестница вверх	11,0	9,9

Таблица 51. Удельный поток через проём в установившейся фазе, м/мин

b, м	**Требование табл. П2.8**	**Базовая**	**Δ**	**В допуске ±10 %**	**Откалиброванная (режим УАМ)**	**Δ**	**В допуске ±10 %**
0,8	5,50	8,29	**+50,8 %**	нет	5,50	0,0 %	да
1,0	6,25	8,41	**+34,5 %**	нет	6,25	−0,1 %	да
1,2	7,00	8,45	**+20,8 %**	нет	6,99	−0,2 %	да
1,4	7,75	8,51	+9,8 %	да	7,74	−0,1 %	да
1,6	8,50	8,52	+0,3 %	да	8,50	−0,1 %	да
2,0	8,50	8,50	0,0 %	да	8,50	0,0 %	да

При базовой конфигурации **в допуске ±10 % три ширины из шести**, а именно 1,4 м и шире. Точка b = 1,4 м пограничная (+9,8 %). На узких проёмах (0,8; 1,0 и 1,2 м) расчётный удельный поток больше требования табл. П2.8 на 20,8…50,8 %, а значит, расчётное время эвакуации меньше вычисленного по упрощённой аналитической модели методики. Для проёма 0,8 м при 200 людях расчёт даёт 179,8 с против 272,8 с по таблице: отклонение −93,0 с (−34,1 %), вне допуска ±10 %. При откалиброванной конфигурации в режиме УАМ удельный поток отличается от табл. П2.8 не более чем на 0,2 % на всех ширинах: **в допуске шесть из шести**. Время выхода 200 человек через проём 0,8 м составляет 272,8 с.

Причина расхождения одна: единое значение базовой конфигурации 1,42 чел/(с·м) взято из табл. П2.8 для широкого проёма. При b ⩾ 1,6 м расчёт с требованием совпадает, а на узких проёмах превышает его тем больше, чем уже проём. В режиме УАМ предел створа вычисляется по ширине, и таблица воспроизводится целиком. Расчёт без ограничения разобран в разделе 2.6: на тех же шести ширинах удельный поток составляет 15,4…19,2 м/мин.

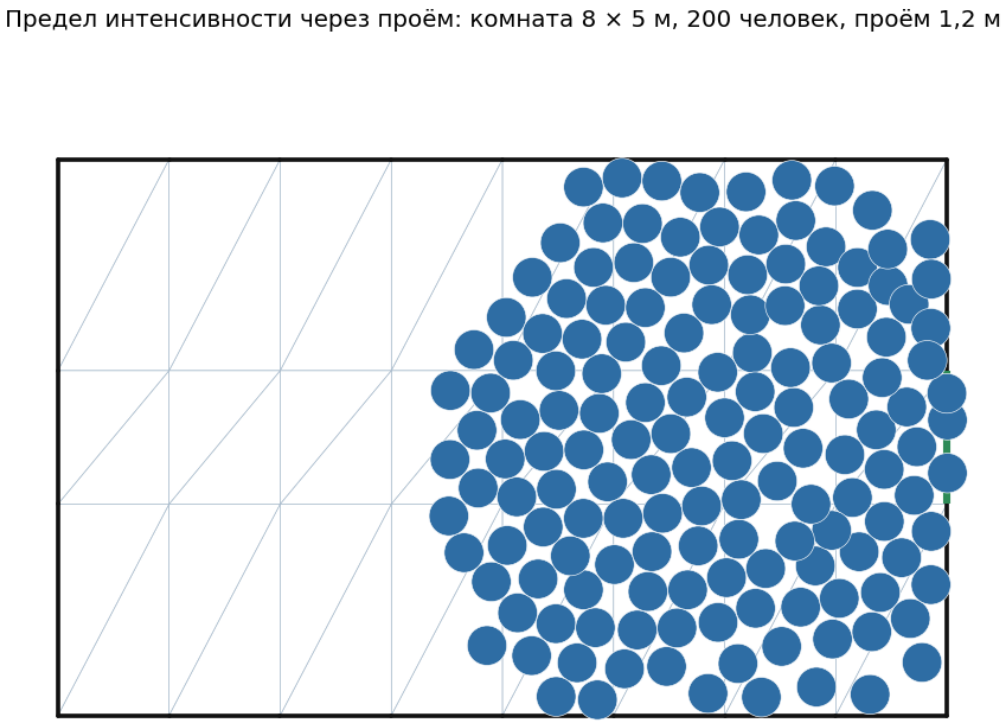


Рисунок 101. Кадр расчёта на 30-й секунде при проёме 1,2 м: перед створом стоит скопление, поток через проём ограничен пределом потока проёма

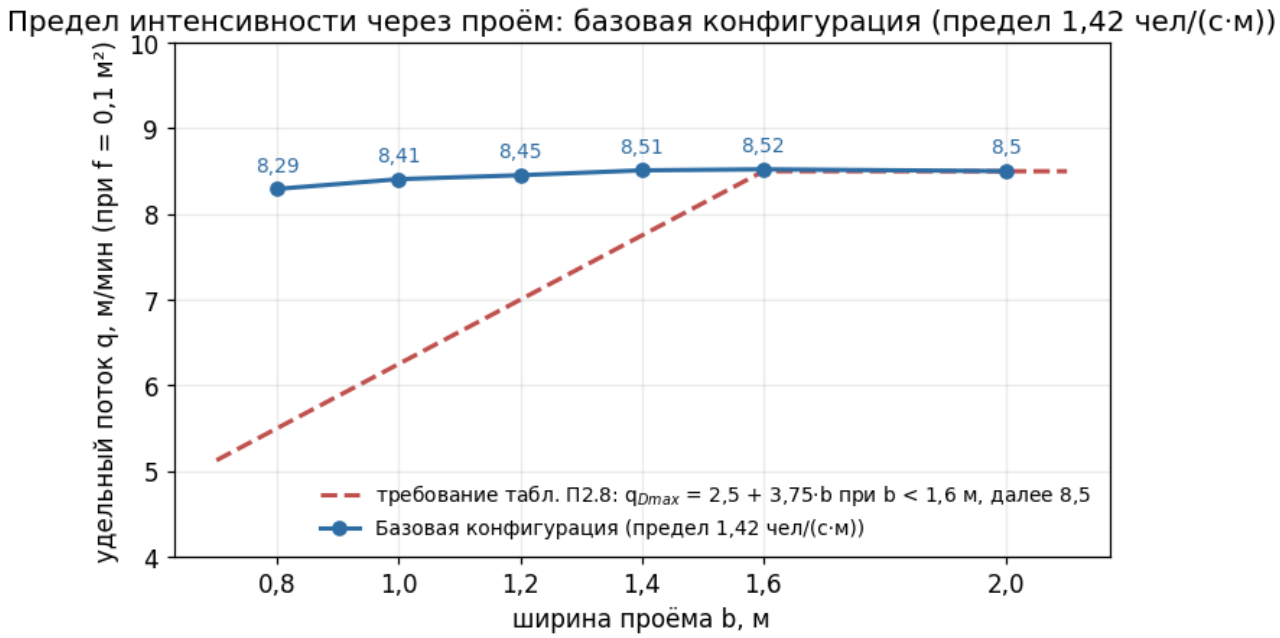


Рисунок 102. Удельный поток через проём по ширине при базовой конфигурации с пределом 1,42 чел/(с·м) против требования таблицы П2.8. По оси абсцисс ширина проёма, м, по оси ординат удельный поток, м/мин

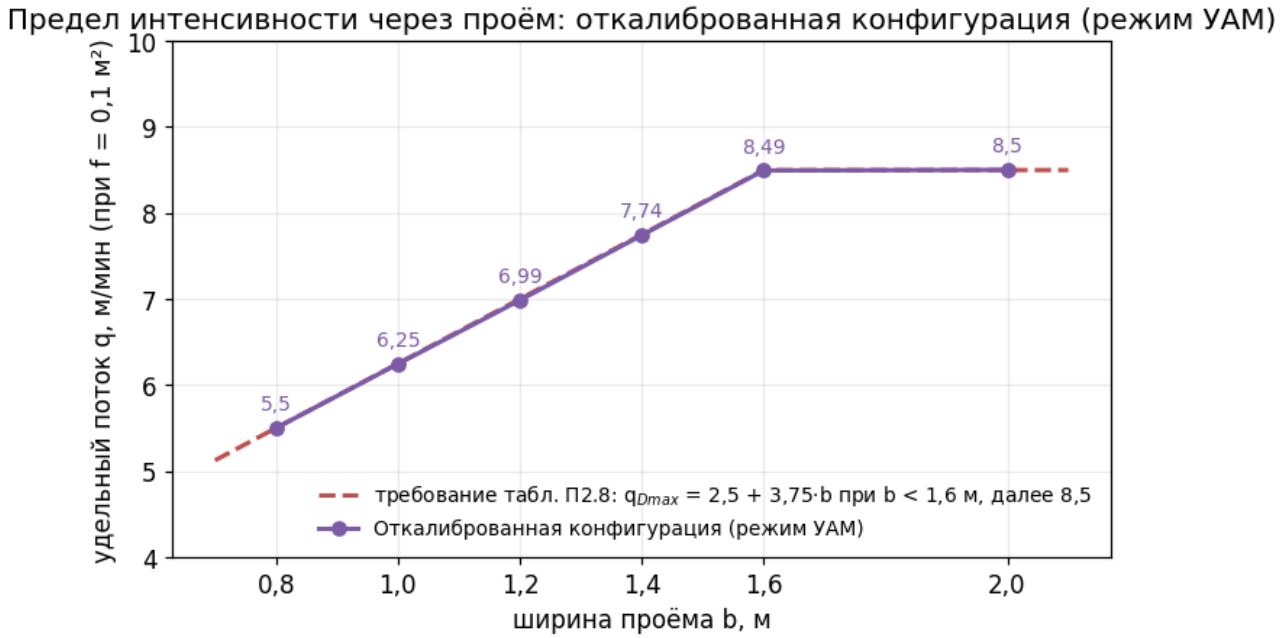


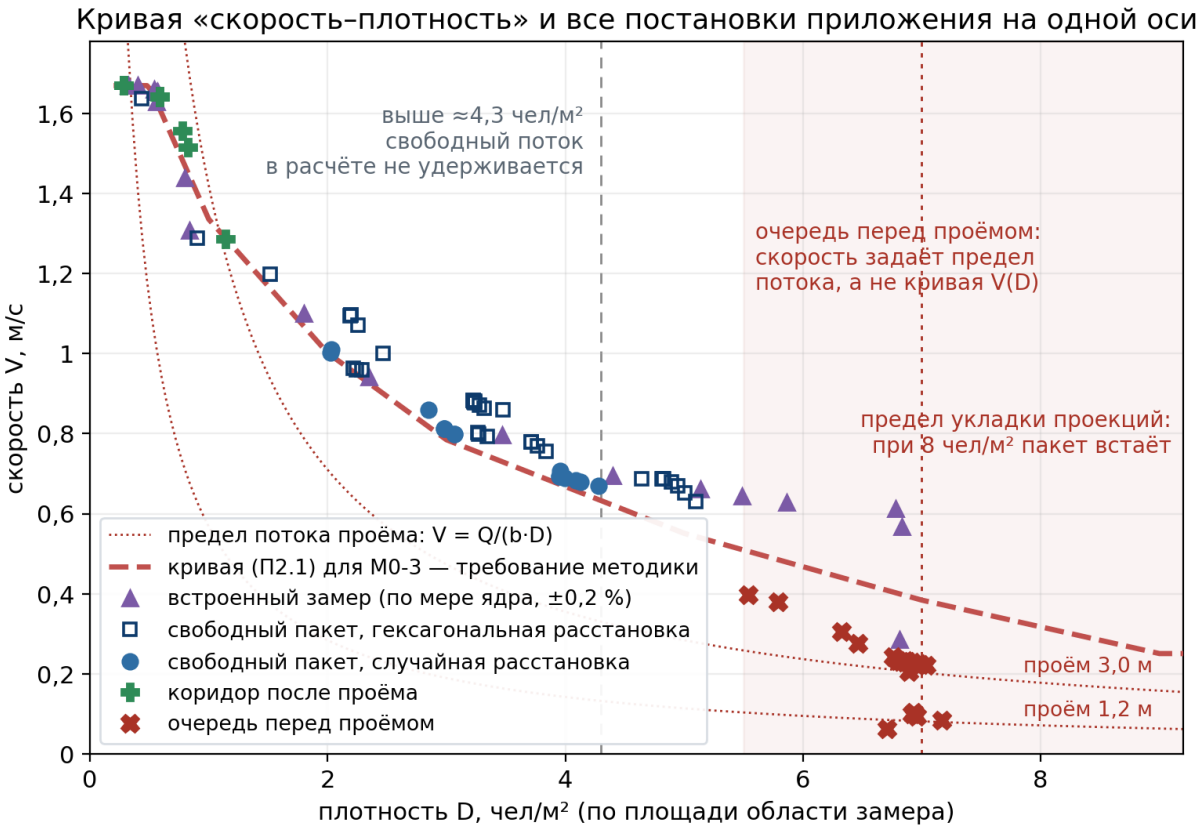
Рисунок 103. То же при откалиброванной конфигурации (режим УАМ): расчётные значения отличаются от требования таблицы П2.8 не более чем на 0,2 % на всех шести ширинах. По оси абсцисс ширина проёма, м, по оси ординат удельный поток, м/мин

КРИВАЯ «СКОРОСТЬ–ПЛОТНОСТЬ» В РАСЧЁТЕ: ГДЕ ОНА ВОСПРОИЗВОДИТСЯ И ГДЕ СКОРОСТЬ ЗАДАЁТ ПРОЁМ

Кривая (П2.1) задана ядру таблицей, но в расчёте скорость человека складывается из кривой, взаимного расположения людей и ограничения потока впереди. Результат замера поэтому различается в открытом коридоре, в плотном пакете и в очереди перед створом, и зависимость проверена на пяти постановках.

Таблица 52. Отклонение расчёта от кривой (П2.1) по пяти постановкам, шкала плотности – по площади

Постановка	**Диапазон D, чел/м²**	**Отклонение от кривой (П2.1)**	**В допуске ±10 %**	**Что задаёт скорость**
Коридор после проёма	0,28…1,14	−0,2…+4,8 %	да	кривая V(D); плотность ограничена проёмом выше по потоку
Тест 13 [5], случайная расстановка	0,47…3,89	−7,0…+2,0 %	да	кривая V(D)
Коридор 3 × 50 м, гексагональная расстановка	0,44…2,0	−7,9…+3,0 %	да	кривая V(D)
то же	2,2…4,89	**+11,0…+20,4 %**	нет	кривая V(D), но мера плотности насыщена правильным шагом расстановки
Свободный пакет, случайная расстановка	2,02…4,28	+0,5…+5,3 %	да	кривая V(D)
Свободный пакет, гексагональная расстановка	2,19…5,10	+1,0…+20,2 %	нет	то же и влияние правильного шага
Открытый коридор 2 × 200 м, случайная расстановка	1…4 (задано)	медиана +4,7…+5,2 %; 95…100 % клеток «зона × момент» в пределах ±10 %	да	кривая V(D)
Открытый коридор 2 × 200 м, гексагональная расстановка	1…5 (задано)	середина пакета +8…+10 %, замыкающая часть **+21…+24 %**	нет	влияние правильного шага расстановки
Встроенный замер, плотность **по мере ядра**	0,32…6,78	**−0,9…0,0 %**	да	кривая V(D) – исполняется точно
Встроенный замер, та же плотность **по площади**	0,32…6,78	+0,2…**+55,1 %** (выше +10 % при плотности свыше 4,3 чел/м²)	нет	та же кривая; расхождение – разница шкал плотности
Встроенный замер при заданных 8 чел/м² (0,8 м²/м²)	6,81	равновесия нет, движение пакета прекращается	–	предел укладки проекций
Очередь перед проёмом 3,0 м	6,33…7,03	**−48…−30 %**, на устойчивом плато 6,8…7,0 чел/м² – −48…−40 %	нет	предел потока проёма: $V = Q/(b_{кор} \cdot D)$
Очередь перед проёмом 1,2 м	6,71…7,17	**−85…−73 %**	нет	то же



Профиль М0-3, V_0 = 1,67 м/с; точки очереди лежат на гиперболе потока проёма, а не на кривой; встроенный замер совпадает со значением кривой при плотности по мере ядра с точностью 0,2 %.

Рисунок 104. Кривая (П2.1) и точки расчёта при базовой конфигурации по пяти постановкам. По оси абсцисс плотность, чел/м², по оси ординат скорость, м/с. Точечными линиями показана гипербола предела потока V = Q/(b·D) для проёмов 3,0 и 1,2 м

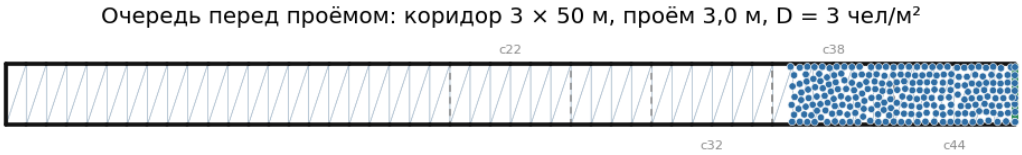


Рисунок 105. Кадр расчёта на 60-й секунде: фронт очереди от проёма дошёл до середины коридора. Штриховыми прямоугольниками показаны зоны замера

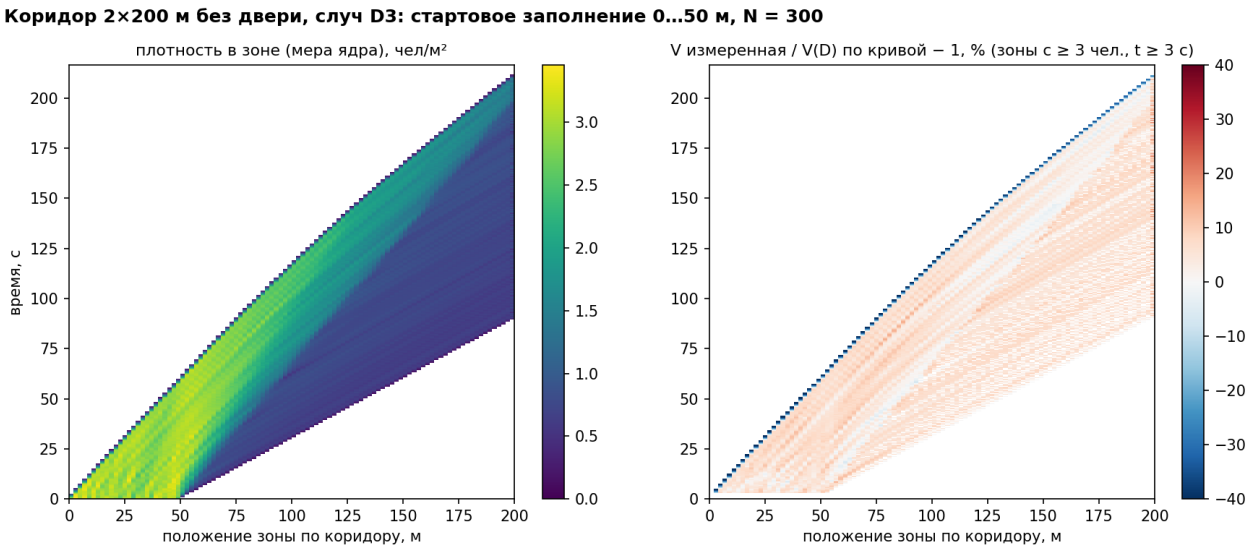


Рисунок 106. Открытый коридор 2 × 200 м, случайная расстановка 3 чел/м², базовая конфигурация: слева плотность по длине коридора и времени, справа отклонение скорости от кривой (П2.1), %

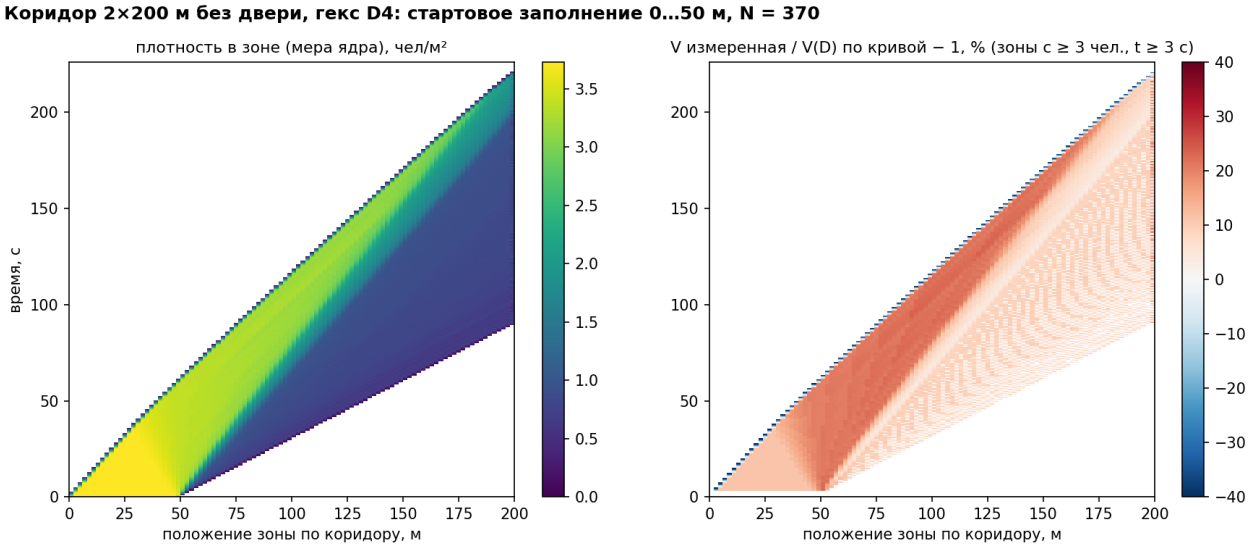


Рисунок 107. То же при гексагональной расстановке 4 чел/м²: в замыкающей части пакета правильный шаг сохраняется дольше, и там отклонение скорости от кривой (П2.1) доходит до +21…+24 %

По мере ядра кривая исполняется точно всюду, где пакет движется как целое. При 8 чел/м² равновесия нет, поскольку достигнут предел укладки проекций. В шкале методики расчёт согласуется с кривой (П2.1) до ≈4,3 чел/м² при любой расстановке, кроме идеально правильной. Отклонение +5 % при случайной расстановке складывается из времени разгона и определения плотности по соседям впереди и остаётся в допуске ±10 %. Отклонение +11…+24 % относится к прямолинейному движению по идеально правильной решётке и при сходящихся к створу путях уменьшается до +1…+7 %. Плотность 5…9 чел/м² возникает только перед проёмом, в затенённой области сводного рисунка, где скорость задаёт предел потока $V = Q/(b_{кор} \cdot D)$. Там с методикой совпадает не скорость, а интенсивность: время выхода последнего человека равно $N/(1{,}42 \cdot b)$ с точностью **+0,2…+0,8 %**. Расчётное время эвакуации тогда больше вычисленного по кривой.

ПОТОКИ ЧЕРЕЗ ДВЕРИ, МАРШИ И КОРИДОРЫ

Проверяется, какой удельный поток образуется на каждом виде пути и как он соотносится с предельными интенсивностями табл. П2.8.

Таблица 53. Удельный поток через элементы пути шириной 0,7…3,0 м

Элемент пути	Требование методики	Базовая конфигурация
Дверь 0,7…3,0 м	q_{Dmax} проёма 8,5 м/мин ≡ 1,42 чел/(с·м) при b ⩾ 1,6 м	1,41…1,42 чел/(с·м): отклонение от предела −1,0…0,0 %, на дверях шириной менее 1,6 м удельный поток ниже предела
Марш 0,7…3,0 м вниз	q_{max} лестницы вниз 16,0 м/мин ≡ 2,67 чел/(с·м)	1,29…1,38 чел/(с·м) – вдвое ниже предела марша: поток задаёт дверь на марш, а не сам марш
Коридор 0,7…3,0 м	q_{max} горизонтального пути 16,5 м/мин ≡ 2,75 чел/(с·м)	1,24…1,38 чел/(с·м); разброс по длине входного плеча – 3,2 % на коридоре 3 м и 9,3 % на коридоре 1 м при плечах 0 / 0,5 / 1,0 / 2,0 м

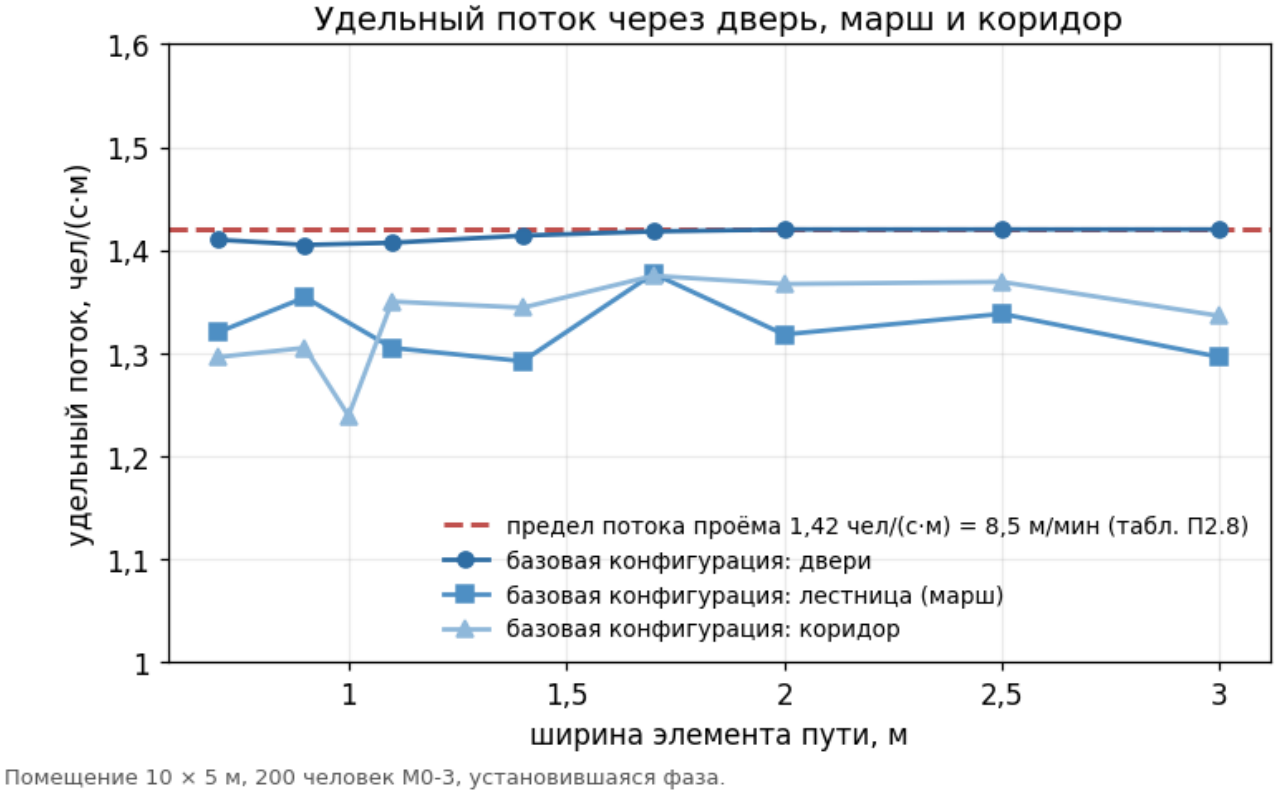


Рисунок 108. Удельный поток через дверь, марш и коридор по ширине при базовой конфигурации против предела потока проёма 1,42 чел/(с·м) = 8,5 м/мин таблицы П2.8. По оси абсцисс ширина элемента, м, по оси ординат удельный поток, чел/(с·м)

Поток на всех трёх видах пути определяет самый узкий створ выше по потоку, а не сам элемент. Предельные интенсивности марша и горизонтального пути (16,0 и 16,5 м/мин) вдвое выше расчётных значений и в рассмотренных постановках не достигаются. Сопоставление тех же потоков с гидравлической моделью дано в приложении Г13.

НЕЗАВИСИМОСТЬ РЕЗУЛЬТАТА ОТ ШАГА РАСЧЁТА

Требование [3] к численной схеме: результат не должен зависеть от шага расчёта. Во всех моделях документа шаг равен 0,025 с. Проверено его изменение вчетверо (0,05 / 0,025 / 0,0125 с) на трёх постановках разного вида.

Таблица 54. Влияние шага расчёта на время выхода последнего человека в трёх постановках, с

Постановка	Расстановок	Шаг 0,05 с	Шаг 0,025 с	Шаг 0,0125 с	Отклонение от значения при 0,025 с	Размах по расстановкам
Казарма Дюссельдорф 2006, проём 1,2 м, 178 человек, предел 1,42 чел/(с·м)	5	122,7	122,9	123,2	−0,14 и +0,22 %	3,2…6,2 %
Тест 11 ISO 20414, помещение 8 × 5 м, дверь 1,0 м, 100 человек	5	71,92	72,35	72,35	−0,59 и 0,00 %	1,7…3,2 %
Лестничная клетка NIST, 10 этажей, клетка A, 436 человек	3	793,5	794,5	794,2	−0,13 и −0,04 %	11,0…11,1 %

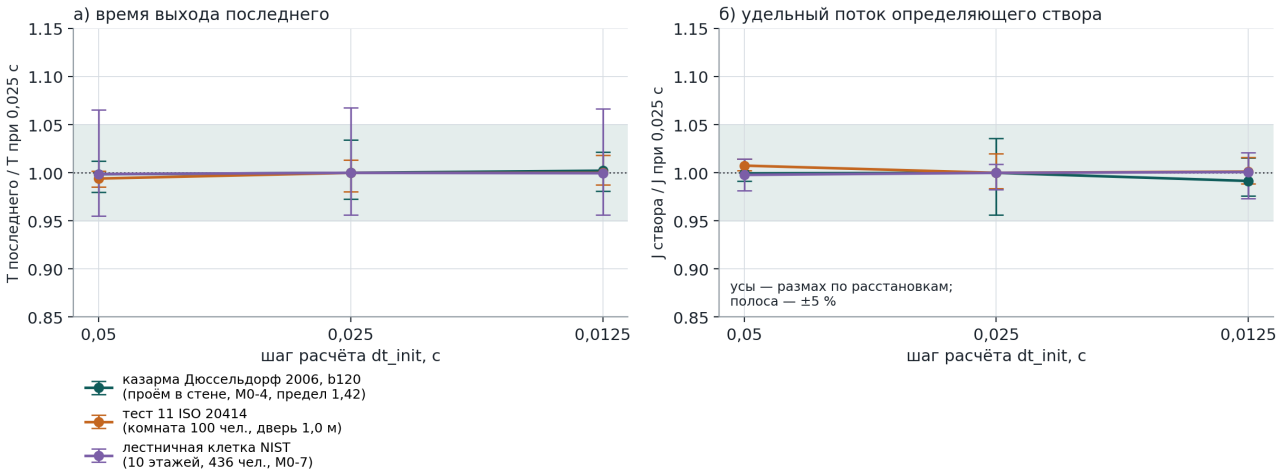


Рисунок 109. Время выхода последнего человека при шаге расчёта 0,05 / 0,025 / 0,0125 с в трёх постановках. По оси ординат секунды. Усы показывают размах по расстановкам, полоса ±5 %

Расчётное время выхода последнего человека изменяется на 0,00…0,59 %, а удельный поток створа на 0,05…0,85 %. Оба изменения меньше размаха того же времени по расстановкам, 1,7…11,1 %, принятого нижним уровнем значимости расхождений (раздел 1.4). Изменение немонотонно, а по знаку между расстановками непостоянно. Поскольку направление движения человека обновляется с отдельным интервалом 0,1 с, лестничная клетка нечувствительна к шагу по каждой расстановке в отдельности, не более 0,2 % по модулю. В рассмотренных постановках требование к численной схеме выполняется, и уменьшение шага вдвое результат не уточняет.

Г2.4 Выводы

Базовые зависимости приложения № 2 методики воспроизводятся ядром в допуске верификации: скорости свободного движения всех профилей библиотеки по трём видам пути (выполняется и более строгая оценка), табулированная кривая «скорость–плотность» относительно формулы (П2.1), площади и габариты проекций. Единственное систематическое расхождение относится к пределу интенсивности через проём. При базовой конфигурации предел один на любой ширине, поэтому на узких проёмах расчётный удельный поток больше требования табл. П2.8, а расчётное время эвакуации через такие створы меньше вычисленного по методике: в допуске половина ширин. При откалиброванной конфигурации предел вычисляется по ширине проёма в режиме УАМ, требование табл. П2.8 выполняется на всех ширинах, и расчётное время выхода через узкий проём возрастает. Кривая (П2.1) исполняется точно по мере плотности, которой пользуется ядро, и согласуется с методикой по шкале «число людей на площадь» во всём диапазоне плотностей движущегося потока; при большей плотности, которая

возникает только в очереди перед створом, скорость задаёт предел потока проёма, и расчётное время эвакуации больше вычисленного по кривой.

Приложение Г3. Задачи пособия Академии ГПС: участок 20 × 2 м с проёмами 1,2 и 0,8 м (задачи 1–27)

Г3.1 Источник и данные

Учебно-методическое пособие Академии ГПС МЧС России [10] содержит 42 задачи, «которые просчитываются ручным способом по элементарным формулам, приведённым в нормативных документах». Пособие предназначено для проверки программ моделирования эвакуации: расчётчик получает постановку и ответ, вычисленный вручную, и сравнивает с ним результат программы. Здесь воспроизводятся задачи 1-2…27-2 (глава 2, §§ 2.1–2.3): три серии по девять задач, в которых из одного и того же помещения при девяти плотностях расстановки люди выходят через выход разной ширины. Сравнение ведётся с аналитическим решением, поэтому допуск документа равен ±10 %. Авторы пособия приняли те же 10 %, и для сведения приведена более строгая оценка ±5 %.

Постановка одна на все 27 задач: участок 20 × 2 м, равномерная расстановка с плотностью $D_{расст}$ = 0,1… 0,9 м²/м² при N = 40…360 человек. Приняты f = 0,1 м², профиль М0-3 по методике [1] (V_0 = 100 м/мин, a = 0,295, D_0 = 0,51 чел/м², табл. П2.6) и время начала эвакуации ноль.

Серии различаются только выходом в торце участка:

- задачи 1-2…9-2: проёма нет, торец открыт на всю ширину 2,0 м. В аналитическом решении это сечение участка, а в модели расчёта выход наружу, оформленный дверью 2,0 м с пределом 1,42 чел/(с·м). По единому правилу документа границу расчётной области обозначает дверь с таким же ограничением.
- задачи 10-2…18-2: в торце проём шириной 1,2 м.
- задачи 19-2…27-2: в торце проём шириной 0,8 м.

Буквой **b** обозначена ширина выхода в торце, $\mathbf{b_{ст}}$ – сечения участка (2,0 м). Ширины до и после переформирования потока обозначены $\mathbf{b_1}$ и $\mathbf{b_2}$.

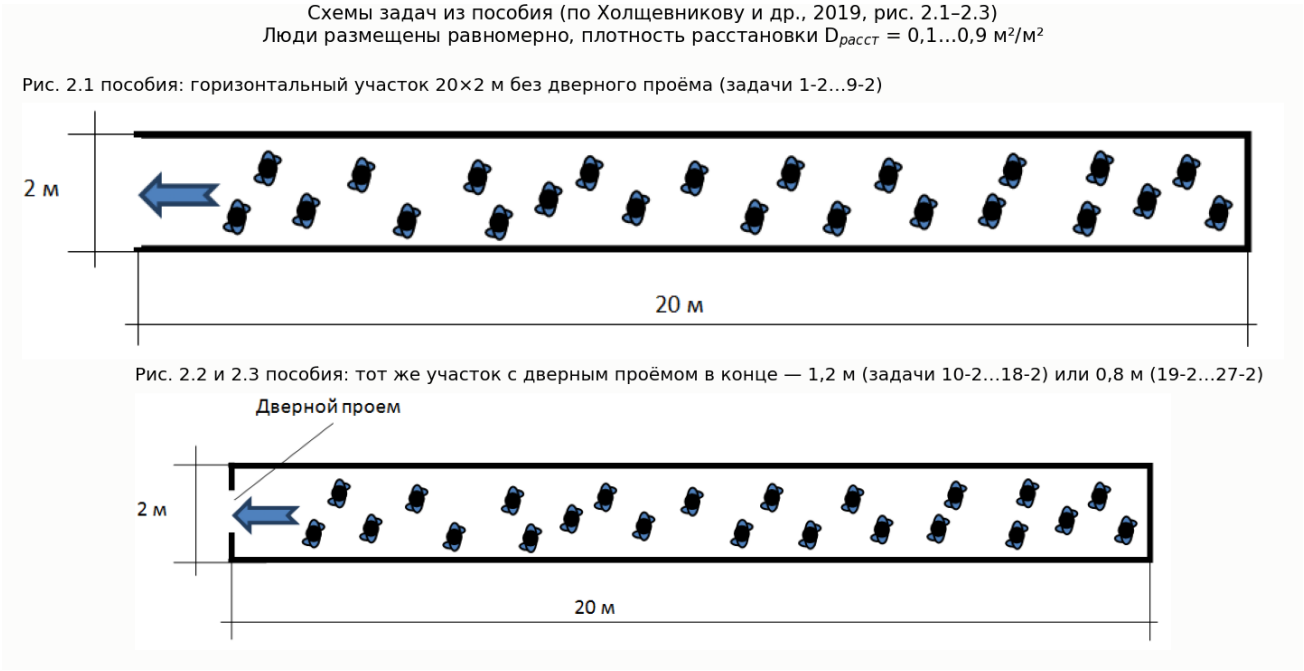


Рисунок 110. Постановка трёх серий задач: участок 20 × 2 м с открытым торцом 2,0 м и с проёмами 1,2 и 0,8 м в торце (по [10], рис. 2.1–2.3)

Постановка и критерий заданы источником, данные полны по построению. Время в пособии получено по формулам (1.1–1.5 и 2.1–2.3), дословно повторяющим упрощённую аналитическую модель приложения № 6 методики [1]. За аналитическое решение принят расчёт по этим формулам, выполненный заново, а не печатные таблицы 2.2/2.4/2.6 пособия: для серии 2,0 м они получены по округлённым скоростям и расходятся с точной формулой до 2,1 %.

Таблица 55. Составляющие времени в аналитическом расчёте пособия, по сериям (в скобках – номера формул пособия и методики)

Составляющая	Формула: пособие [10] → методика [1]	Торец 2,0 м (1-2…9-2)	Проём 1,2 м (10-2…18-2)	Проём 0,8 м (19-2…27-2)
плотность потока в источнике	$D_{расст} = N \cdot f/(l \cdot b_{ст})$ – (1.1) → (П6.3)	0,1…0,9 м²/м²	то же	то же
скорость движения по участку	$V(D_{расст}) = V_0 \cdot (1 - a \cdot \ln(D_{расст}/D_0))$ при $D_{расст} > D_0$ – (1.2) → (П2.1), табл. П2.6	80,1; 59,7; 47,7; 39,2; 32,7; 27,3; 22,7; 18,8; 15,3 м/мин	то же	то же
интенсивность подошедшего потока	$q_1 = D_{расст} \cdot V(D_{расст})$ – (1.4) → (П2.2)	8,0; 11,9; 14,3; 15,7; 16,3; 16,4; 15,9; 15,0; 13,8 м/мин	то же	то же
интенсивность в проёме (переформирование)	$q_2 = q_1 \cdot b_1/b_2$ – (1.5), (2.2) → (П6.4)	$= q_1$ ($b_2 = b_1$)	13,4; 19,9; 23,9; 26,2; 27,2; 27,3; 26,5; 25,1; 23,0 м/мин	20,0; 29,8; 35,8; 39,2; 40,8; 40,9; 39,8; 37,6; 34,5 м/мин
условие скопления перед проёмом	$q_2 > q_{max} = 19{,}6$ м/мин – (1.7) → (П6.7), табл. П2.8	не выполняется	не выполняется только в 10-2	выполняется во всех
время без скопления	$t = l/V(D_{расст})$ – (2.1) → (П6.2)	14,97; 20,10; 25,14; 30,58; 36,74; 43,99; 52,79; 63,85; 78,34 с	10-2: 14,97 с	–
время при скоплении	$t = N \cdot f/(q_{Dmax} \cdot b_2)$, $q_{Dmax} = 2{,}5 + 3{,}75 \cdot b_2$ – (2.3) → (П6.13), табл. П2.8; примечание к табл. 2 [2]	–	$q_{Dmax} = 7{,}0$ м/мин → N/1,40 чел/с: 57,14…257,14 с	$q_{Dmax} = 5{,}5$ м/мин → N/0,733 чел/с: 54,55…490,91 с

Сравнение опирается на две особенности аналитической схемы. Без скопления поток движется единым блоком со скоростью $V(D_{расст})$ на всём пути 20 м: параметры потока заданы в источнике и по ходу движения не пересчитываются [7;8]. При скоплении расчёт сводится к $N \cdot f/(q_{Dmax} \cdot b_2)$. Ни подход к проёму, ни замыкающая часть очереди не добавляются, поскольку (П6.13) определяет время существования скопления.

Г3.2 Расчётная модель и конфигурации расчёта

Каждая задача – отдельная расчётная модель: помещение 20 × 2 м, выход в торце, профиль М0-3 [1, табл. П2.6]. Расстановка равномерно случайная. Каждая задача посчитана в трёх расстановках при двух конфигурациях, итого 162 расчёта. В таблицах приведено среднее по трём расстановкам. Удельный поток измеряется между 10 и 90 % прошедших. При $D_{расст} \geqslant 0{,}7$ м²/м² проекции при начальной расстановке перекрываются, и это свойство постановки источника, а не модели: ядро устраняет перекрытие в первые доли секунды.

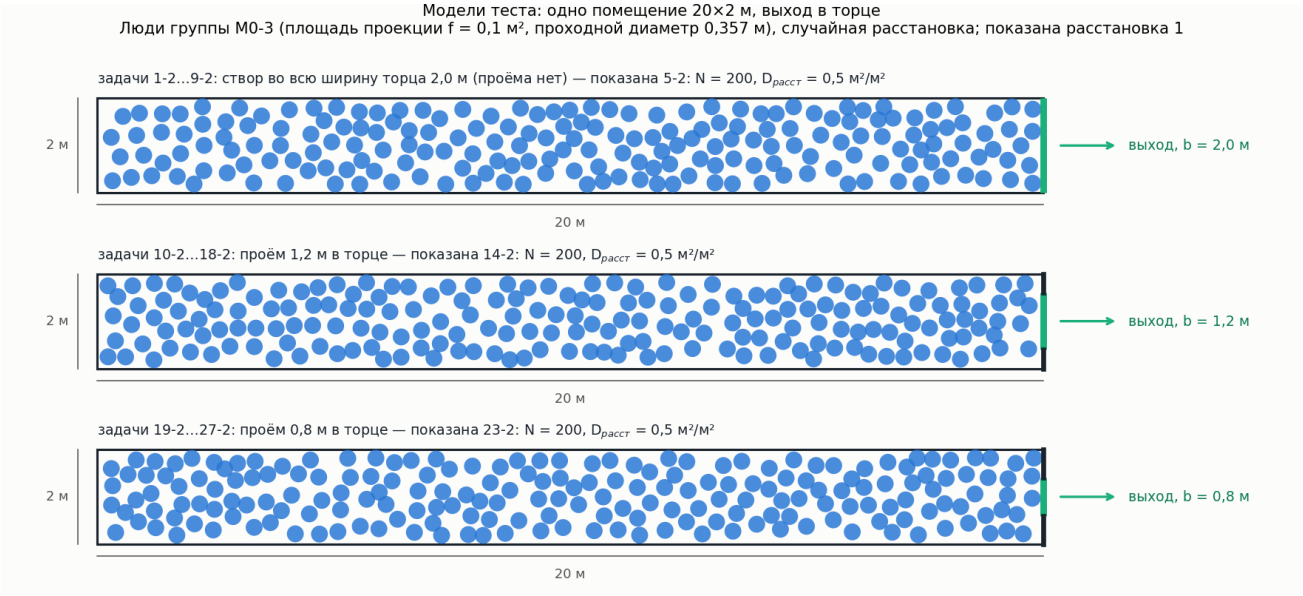


Рисунок 111. План моделей трёх серий: участок 20 × 2 м, выход в торце. Расстановка 1 задач 5-2, 14-2 и 23-2 (N = 200, $D_{расст}$ = 0,5 м²/м²)

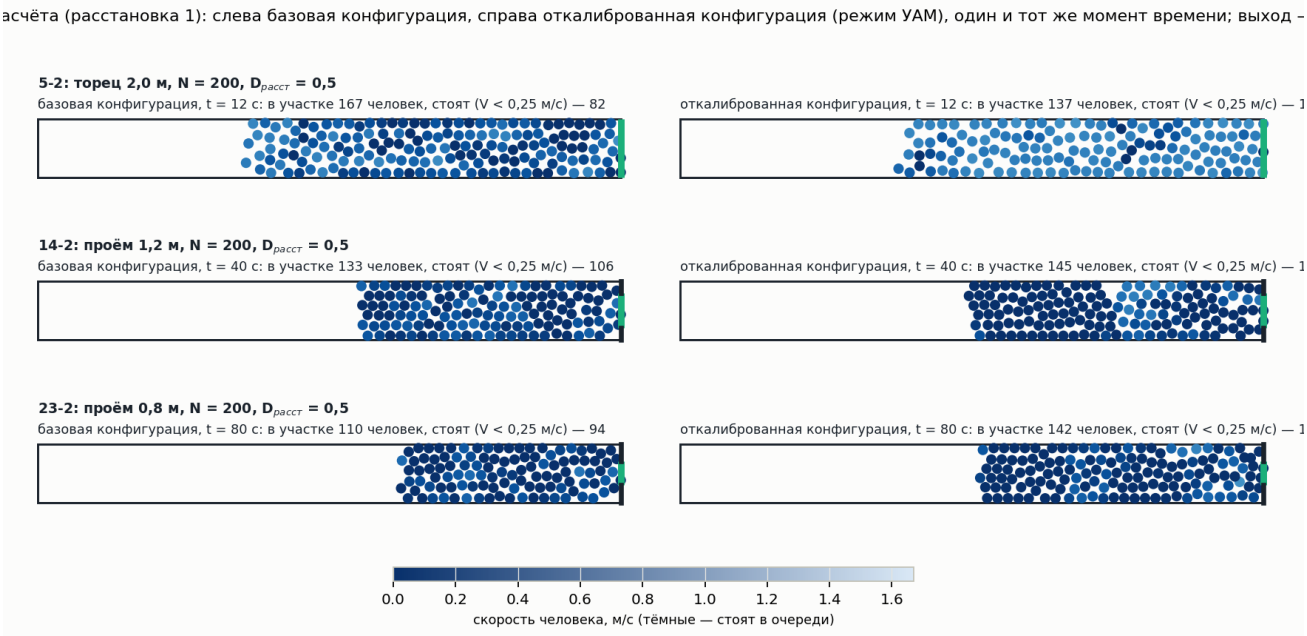


Рисунок 112. Кадры расчёта задач 5-2, 14-2 и 23-2 на 12-й секунде: слева базовая конфигурация с пределом 1,42 чел/(с·м), справа откалиброванная в режиме УАМ. Цветом показана скорость человека, тёмными точками отмечены неподвижные люди в очереди

В задаче 5-2 на 12-й секунде перед торцом 2,0 м при базовой конфигурации неподвижны 82 человека из 167, при откалиброванной их 12.

Собственная геометрическая способность створа примерно вдвое выше нормативных значений (раздел 2.6), поэтому совпадение с аналитическим решением здесь определяет предел потока проёма. Он и есть единственное различие двух конфигураций. В базовой конфигурации предел постоянен и одинаков для любой ширины и плотности: он действует и на проёмах 1,2 и 0,8 м, и на двери торца (2,0 м). В откалиброванной конфигурации включён режим УАМ: предел вычисляется по ходу расчёта по тем же формулам приложения № 6, по которым получено аналитическое решение пособия. Величина предела зависит от ширины проёма и плотности подошедшего потока.

Таблица 56. Конфигурации расчёта

Параметр	Базовая конфигурация	Откалиброванная конфигурация (режим УАМ)	Источник значения
предел потока проёма, общий вид	1,42 чел/(с·м) на любом проёме и сечении	$Q = q \cdot b/(60 \cdot f)$, q пересчитывается по ходу расчёта	значение 1,42 – [1, табл. П2.8] и раздел 2.6; размерность интенсивности при учёте площади проекции – п. 11 прил. № 2; определение q – § 1.2 пособия [10]
сечение участка ($b = b_{ст}$)	те же 1,42 чел/(с·м)	$q = q_{гор}(D_ф) = D_ф \cdot V(D_ф)$ по кривой «скорость–плотность» горизонтального пути при $D_ф \geq 0{,}25$ м²/м²; при $D_ф = 0{,}9$ и более – 13,5 м/мин	формула (П2.2) с V по (П2.1) и табл. П2.6; q_{Dmax} горизонтального пути – табл. П2.8
проём без скопления	те же 1,42 чел/(с·м)	$q = \min(q_{гор}(D_ф) \cdot b_{ст}/b;\ 19{,}6$ м/мин) – переформирование потока с ограничением сверху	формула (П6.4) прил. № 6; $q_{max} = 19{,}6$ м/мин – табл. П2.8
проём при скоплении	те же 1,42 чел/(с·м)	$q = q_{Dmax}(b) = 8{,}5$ м/мин при $b \geq 1{,}6$ м; $2{,}5 + 3{,}75 \cdot b$ при $b < 1{,}6$ м	табл. П2.8; примечание к табл. 2 прил. 2 [2]
условие скопления (только для проёма)	не проверяется	$q_{гор}(D_{уч}) \cdot b_{ст}/b > q_{max}$, где $D_{уч} = N \cdot f/A$ – плотность участка-источника; дополнительно скопление фиксируется, если плотность зоны перед проёмом держится ≥ 0,5 м²/м² дольше 1 с; условие прекращается, когда зона пуста	условие (П6.7) прил. № 6; при невозможности расширить проём параметры потока принимаются «при значении D = 0,9 и более» (текст после (П6.9)); плотность участка – (П6.3)
плотность формирования потока $D_ф$	не используется	наибольшая с момента заполнения зоны перед проёмом (полукруг радиусом 1,5 м внутрь участка) из $D_{уч}$ и плотности этой зоны; сбрасывается, когда зона пуста; снизу ограничена 0,1 м²/м²	(П6.2), (П6.3): параметры потока определяются плотностью в источнике и по ходу движения не пересчитываются

Трёх чисел режима УАМ в методике нет, они приняты при постановке этих расчётов: **радиус зоны 1,5 м**, **порог 0,5 м²/м² с выдержкой 1 с** и **0,25 м²/м² для сечения участка**. Плотность 0,5 м²/м² отвечает наибольшей интенсивности в проёме по табл. 2 [2].

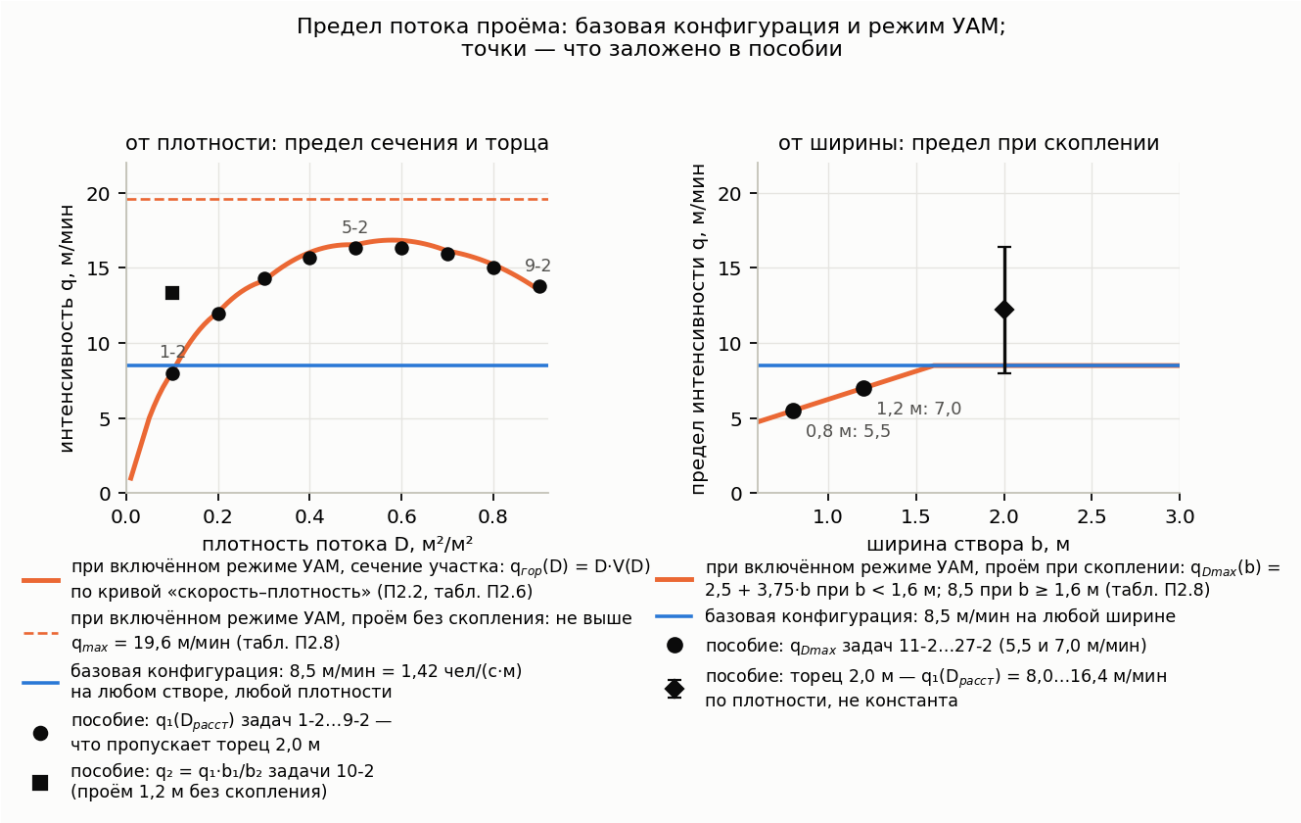


Рисунок 113. Предел в двух конфигурациях: слева он показан от плотности подошедшего потока, справа от ширины проёма при скоплении. Горизонталь отвечает постоянному пределу 1,42 чел/(с·м) базовой конфигурации, ломаные – режиму УАМ

Точками на рисунке показаны q_1 задач 1-2…9-2, а также q_2 слева для 10-2 и справа для 11-2…27-2. Штрихом проведена верхняя граница 19,6 м/мин.

Г3.3 Результаты и анализ

Отклонение Δ = расчёт − аналитическое решение, среднее по трём расстановкам. В скобках приведено то же в процентах.

Таблица 57. Время освобождения участка: аналитическое решение пособия, базовая и откалиброванная конфигурации

Задача	b, м	N	$D_{расст}$, м²/м²	Аналитическое решение, с	Базовая, с	Δ, с (%)	В допуске ±10 %	Откалиброванная (режим УАМ), с	Δ, с (%)	В допуске ±10 %	Размах по расстановкам, с
1-2	2,0	40	0,1	14,97	15,5	+0,5 (+3,3 %)	да	15,2	+0,2 (+1,3 %)	да	0,8
2-2	2,0	80	0,2	20,10	28,5	+8,4 (+41,8 %)	нет	19,6	−0,5 (−2,3 %)	да	0,3
3-2	2,0	120	0,3	25,14	42,7	+17,6 (+69,8 %)	нет	24,6	−0,5 (−2,0 %)	да	0,5
4-2	2,0	160	0,4	30,58	56,8	+26,2 (+85,6 %)	нет	30,2	−0,4 (−1,1 %)	да	0,5
5-2	2,0	200	0,5	36,74	70,7	+34,0 (+92,4 %)	нет	37,1	+0,4 (+0,9 %)	да	0,7
6-2	2,0	240	0,6	43,99	84,7	+40,7 (+92,6 %)	нет	44,8	+0,8 (+1,9 %)	да	2,1
7-2	2,0	280	0,7	52,79	98,8	+46,0 (+87,2 %)	нет	53,6	+0,8 (+1,6 %)	да	2,0
8-2	2,0	320	0,8	63,85	112,9	+49,1 (+76,9 %)	нет	64,0	+0,1 (+0,3 %)	да	0,6
9-2	2,0	360	0,9	78,34	127,0	+48,7 (+62,2 %)	нет	80,5	+2,2 (+2,8 %)	да	0,5
10-2	1,2	40	0,1	14,97	23,9	+8,9 (+59,6 %)	нет	17,4	+2,4 (+16,0 %)	нет	0,3
11-2	1,2	80	0,2	57,14	47,4	−9,7 (−17,1 %)	нет	57,4	+0,3 (+0,5 %)	да	0,3
12-2	1,2	120	0,3	85,71	70,8	−14,9 (−17,4 %)	нет	85,8	+0,1 (+0,1 %)	да	0,3
13-2	1,2	160	0,4	114,29	94,3	−20,0 (−17,5 %)	нет	114,5	+0,2 (+0,1 %)	да	0,6
14-2	1,2	200	0,5	142,86	118,1	−24,8 (−17,4 %)	нет	143,0	+0,1 (+0,1 %)	да	0,2
15-2	1,2	240	0,6	171,43	141,7	−29,7 (−17,3 %)	нет	171,5	+0,1 (+0,1 %)	да	0,4
16-2	1,2	280	0,7	200,00	165,4	−34,6 (−17,3 %)	нет	200,0	+0,0 (+0,0 %)	да	0,3

Задача	b, м	N	$D_{расст}$, м²/м²	Аналитическое решение, с	Базовая, с	Δ, с (%)	В допуске ±10 %	Откалиброванная (режим УАМ), с	Δ, с (%)	В допуске ±10 %	Размах по расстановкам, с
17-2	1,2	320	0,8	228,57	188,5	−40,1 (−17,6 %)	нет	228,6	+0,0 (+0,0 %)	да	0,2
18-2	1,2	360	0,9	257,14	211,9	−45,2 (−17,6 %)	нет	257,6	+0,5 (+0,2 %)	да	0,8
19-2	0,8	40	0,1	54,55	35,7	−18,8 (−34,6 %)	нет	53,8	−0,8 (−1,3 %)	да	0,1
20-2	0,8	80	0,2	109,09	70,6	−38,5 (−35,3 %)	нет	108,4	−0,7 (−0,6 %)	да	0,2
21-2	0,8	120	0,3	163,64	106,2	−57,4 (−35,1 %)	нет	163,4	−0,2 (−0,2 %)	да	0,6
22-2	0,8	160	0,4	218,18	141,5	−76,7 (−35,1 %)	нет	217,7	−0,5 (−0,2 %)	да	0,3
23-2	0,8	200	0,5	272,73	178,2	−94,5 (−34,7 %)	нет	272,1	−0,6 (−0,2 %)	да	0,0
24-2	0,8	240	0,6	327,27	212,2	−115,1 (−35,2 %)	нет	326,7	−0,6 (−0,2 %)	да	0,3
25-2	0,8	280	0,7	381,82	249,0	−132,8 (−34,8 %)	нет	382,4	+0,6 (+0,1 %)	да	2,4
26-2	0,8	320	0,8	436,36	284,7	−151,7 (−34,8 %)	нет	436,6	+0,2 (+0,1 %)	да	2,1
27-2	0,8	360	0,9	490,91	319,9	−171,0 (−34,8 %)	нет	490,5	−0,4 (−0,1 %)	да	0,3

Таблица 58. Сводка отклонений по сериям

Конфигурация	Торец 2,0 м: Δ мин… макс	ср. модуль Δ	в допуске	Проём 1,2 м: Δ мин… макс	ср. модуль Δ	в допуске	Проём 0,8 м: Δ мин… макс	ср. модуль Δ	в допуске	Все 27 задач: в допуске ±10 %	ср. модуль Δ
базовая	+3,3… +92,6 %	68,0 %	1 из 9	−17,6… +59,6 %	22,1 %	0 из 9	−35,3… −34,6 %	34,9 %	0 из 9	**1 из 27**	41,7 %
откалиброванная (режим УАМ)	−2,3… +2,8 %	1,6 %	9 из 9	+0,0… +16,0 %	1,9 %	8 из 9	−1,3… +0,1 %	0,3 %	9 из 9	**26 из 27**	1,3 %

При откалиброванной конфигурации в режиме УАМ 26 задач из 27 совпадают с аналитическим решением в допуске ±10 %. Отклонения не превышают 2,4 с при значениях времени 15…491 с, и при более строгой оценке ±5 % счёт тот же. При базовой конфигурации в допуске одна задача из 27, и при ±5

% она та же. Один и тот же предел применяется и к узким проёмам, где по методике он ниже, и к торцу без проёма, где предела методика не назначает.

Знак отклонения по сериям различен. На торце 2,0 м (задачи 1-2…9-2) расчётное время эвакуации при базовой конфигурации больше аналитического на +3,3…+92,6 %, что даёт оценку сверху. На проёмах 1,2 и 0,8 м расчётное время эвакуации меньше аналитического: задачи 11-2…27-2 дают от −17,1 до −35,3 % (оценка снизу). Исключение составляет задача 10-2, единственная в сериях с проёмом, где по аналитической схеме скопление не образуется, и расчёт больше на +59,6 %.

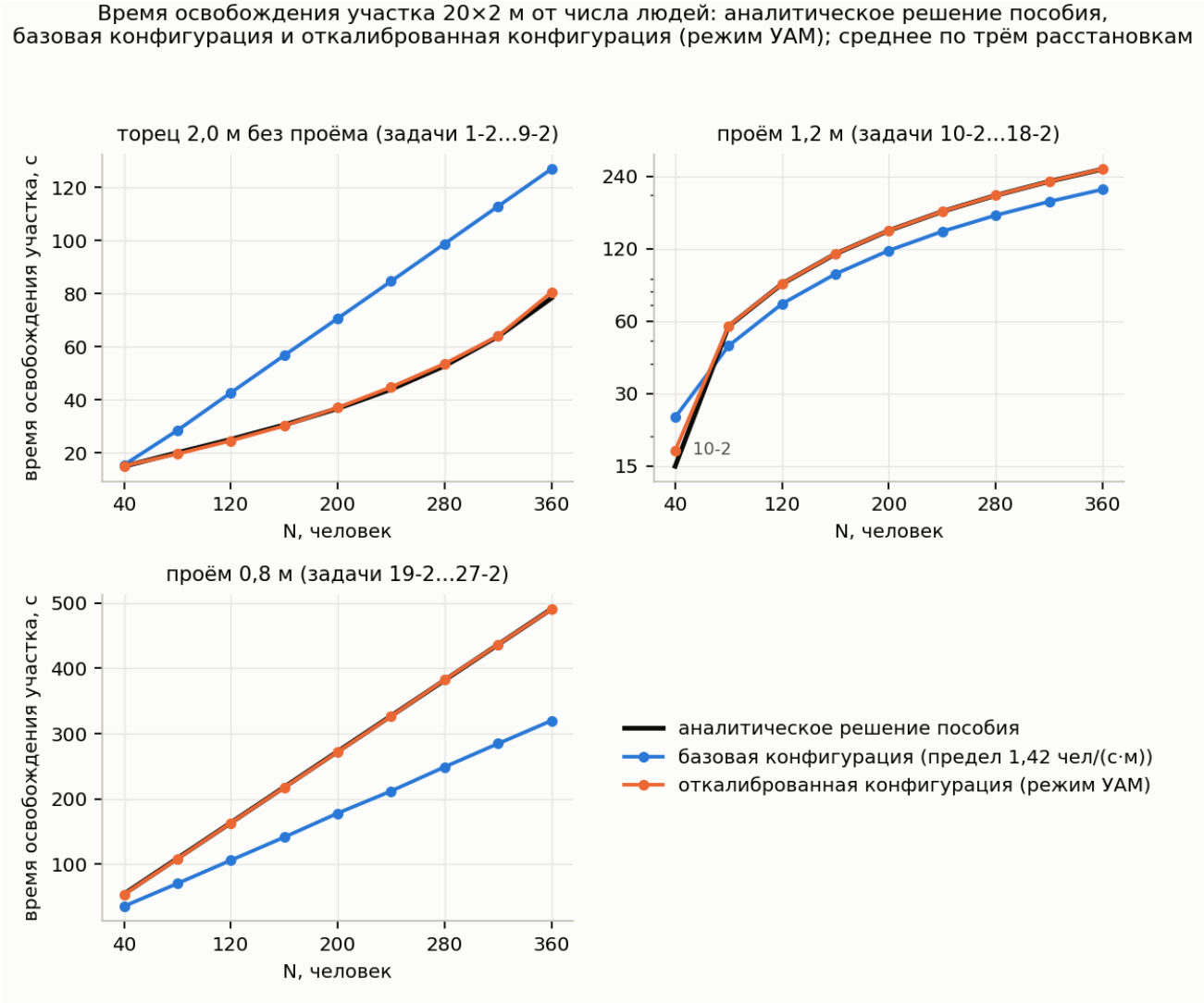


Рисунок 114. Время освобождения участка от числа людей по сериям: аналитическое решение пособия, базовая конфигурация с пределом 1,42 чел/(с·м) и откалиброванная в режиме УАМ, среднее по трём расстановкам. По оси абсцисс число людей N, по оси ординат время, с

В серии 1,2 м шкала времени логарифмическая: между задачами 10-2 и 11-2 аналитическое решение меняется скачком.

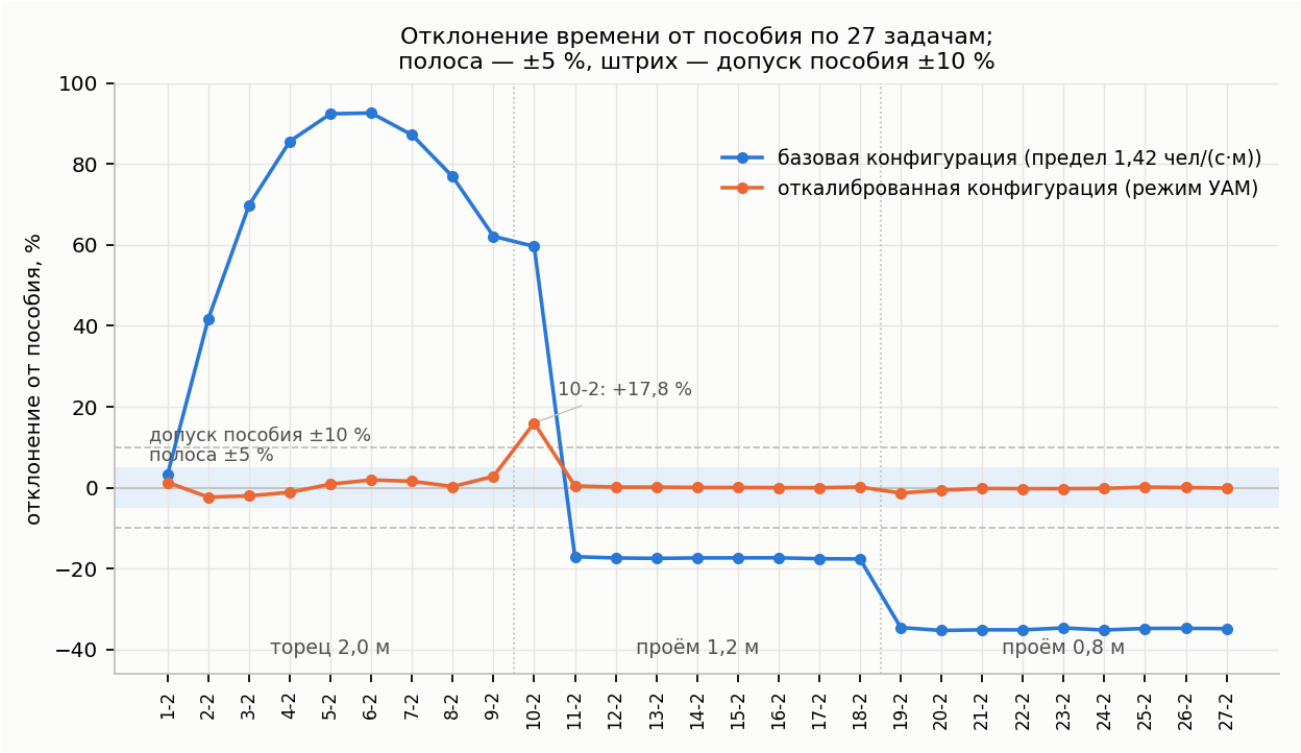


Рисунок 115. Отклонение расчётного времени эвакуации от аналитического решения по 27 задачам при базовой и откалиброванной (режим УАМ) конфигурациях. По оси абсцисс задачи по трём сериям, по оси ординат проценты, полоса ±5 %

Таблица 59. Удельный поток, измеренный на створе в установившейся фазе (между 10 и 90 % прошедших), чел/(с·м)

Серия	Аналитическое решение	Базовая	Откалиброванная (режим УАМ)
торец 2,0 м (2-2…9-2)	1,990…2,728 (по плотности)	1,418…1,421 (ограничен пределом)	2,065…2,756
проём 1,2 м (11-2…18-2)	1,167	1,410…1,417	1,164…1,166
проём 0,8 м (19-2…27-2)	0,917	1,386…1,414	0,910…0,918

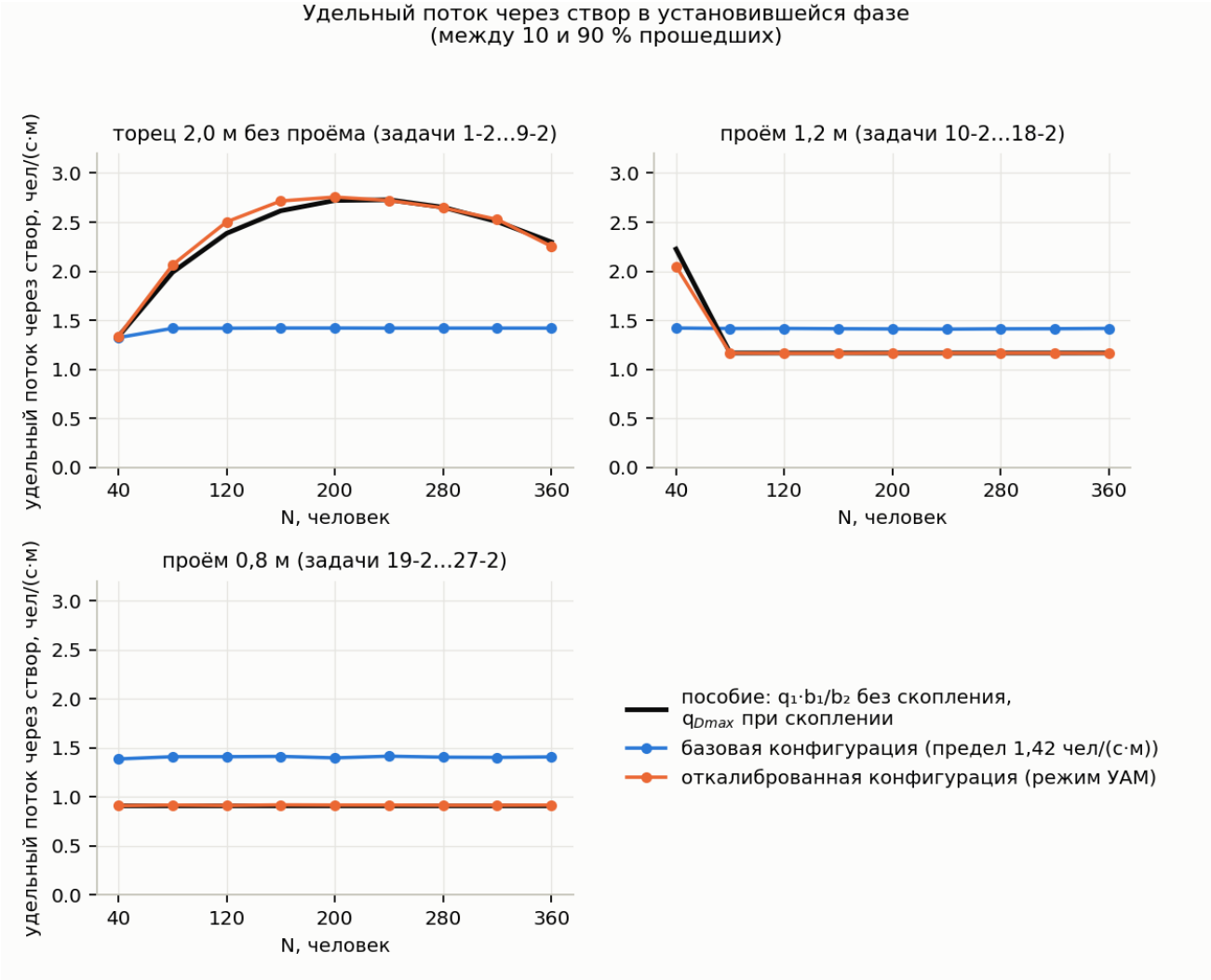


Рисунок 116. Удельный поток на створе по трём сериям: значение, заложенное в пособии, базовая и откалиброванная (режим УАМ) конфигурации. По оси абсцисс серии задач, по оси ординат удельный поток, чел/(с·м)

В сериях 1,2 и 0,8 м отклонение при базовой конфигурации определяет величина предела. Очередь образуется вскоре после начала движения при $D_{расст} \geqslant 0{,}2$ м²/м², и время равно сумме подхода первого человека и N/Q. Отличие от аналитического решения поэтому определяет величина Q: 1,42 чел/(с·м) в расчёте против 1,167 и 0,917 по методике для проёмов 1,2 и 0,8 м соответственно. В режиме УАМ измеренный поток составляет 1,164…1,166 и 0,910…0,918 чел/(с·м), и 16 задач из 18 совпадают с аналитическим решением в пределах 1 %.

В серии 2,0 м предел действует там, где в постановке предела нет. По методике торец есть сечение участка: его интенсивность равна интенсивности подошедшего потока и зависит от плотности (8,0 … 16,4 … 13,8 м/мин по задачам 1-2…9-2), следовательно, постоянным значением по ширине она не описывается. Постоянный предел 1,42 чел/(с·м) задерживает выход, и расчётное время эвакуации становится больше аналитического почти вдвое.

В режиме УАМ берётся плотность формирования потока, а не текущая у проёма. В задаче 9-2 перед торцом она составляет 0,55…0,65 м²/м² при исходных 0,9, и предел по текущему значению рос бы вместе с разрежением фронта, тогда как в методике параметры заданы плотностью в источнике. В режиме УАМ сохраняется наибольшая плотность с момента заполнения зоны: в задаче 9-2 предел составляет 13,5 против 13,8 м/мин по пособию.

О том, почему измеренный поток ниже заданного предела, говорит раздел 2.6.

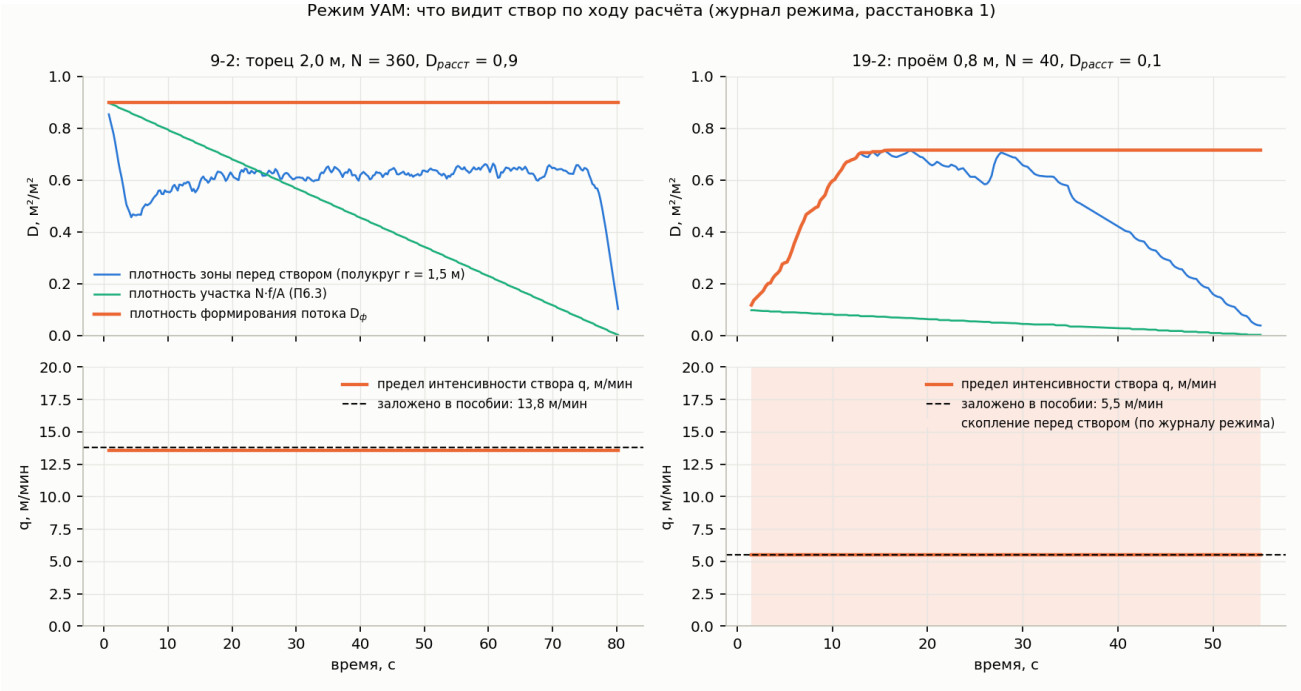


Рисунок 117. Изменение предела на выходе при откалиброванной конфигурации (режим УАМ) по ходу расчёта, расстановка 1: слева задача 9-2, справа 19-2. По оси абсцисс время, с, по оси ординат предел, м/мин

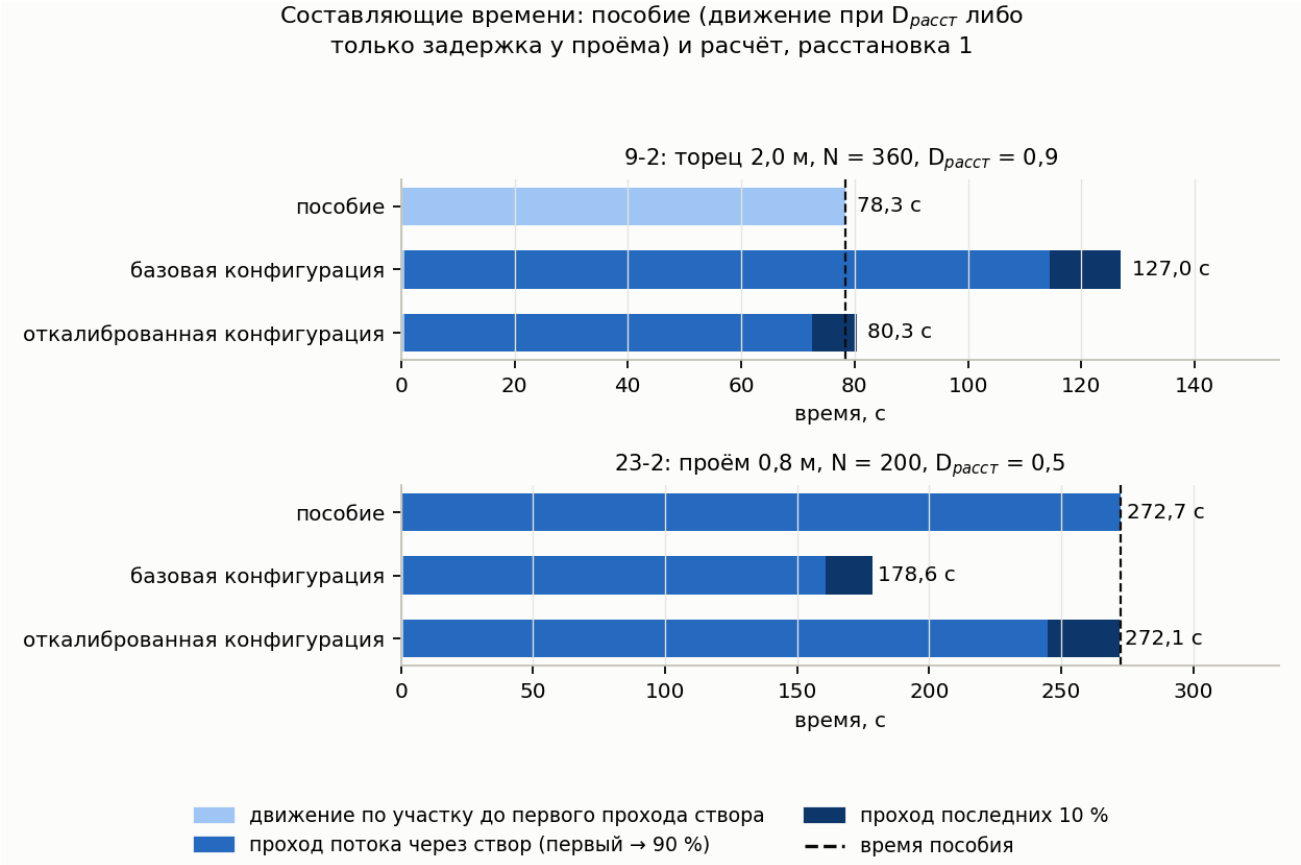


Рисунок 118. Составляющие времени задач 9-2 на торце 2,0 м и 23-2 на проёме 0,8 м, расстановка 1: аналитическое решение, базовая и откалиброванная (режим УАМ) конфигурации. По оси ординат время, с

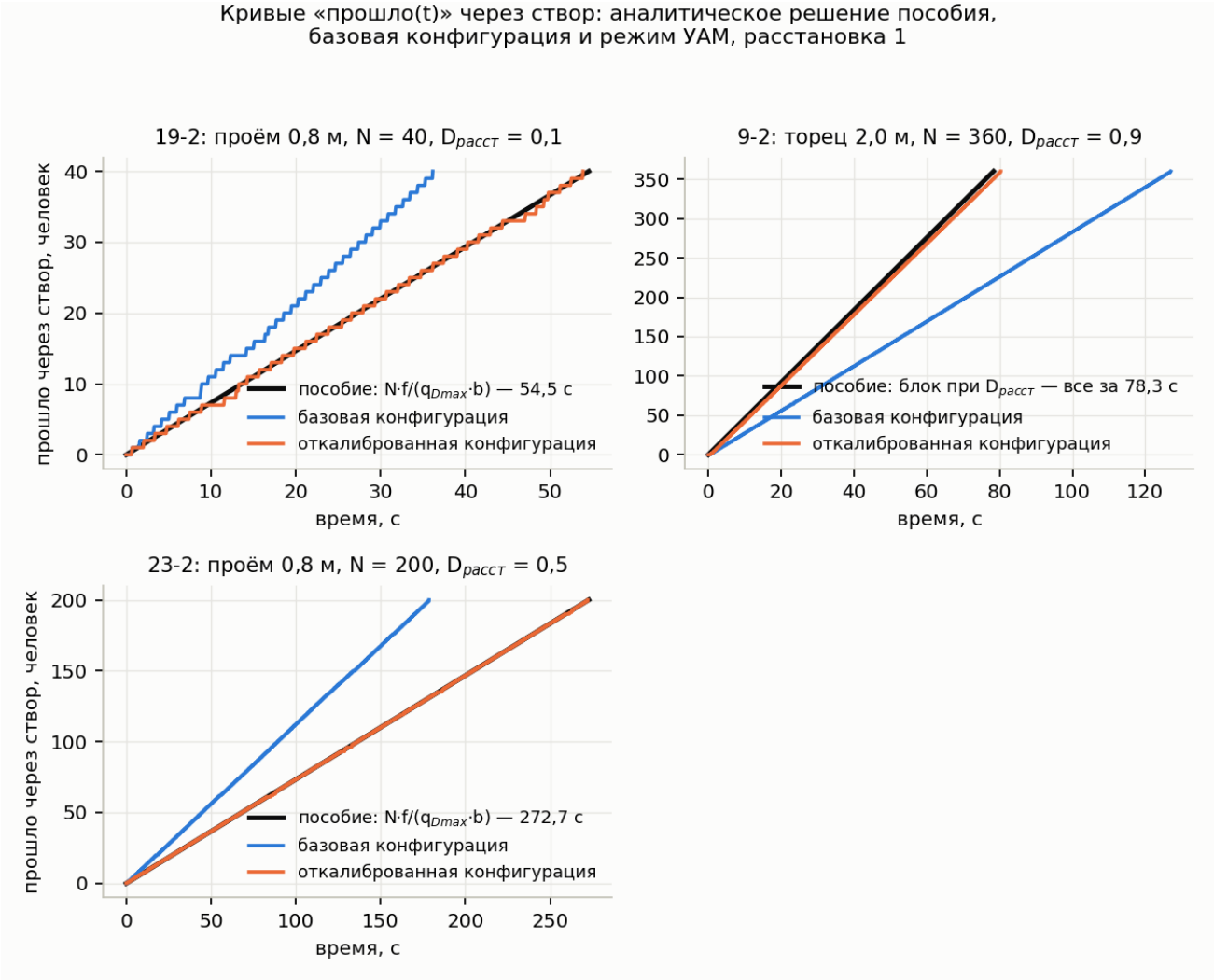


Рисунок 119. Зависимости числа вышедших от времени на створе для задач 19-2, 9-2 и 23-2, расстановка 1: аналитическое решение, базовая и откалиброванная (режим УАМ) конфигурации. По оси абсцисс время, с, по оси ординат число людей

Прямая аналитического решения отвечает установившемуся потоку с нулевого момента: при откалиброванной конфигурации расчётная зависимость совпадает с ней, при базовой проходит выше на проёмах и ниже на торце.

Задача 10-2 – единственное отклонение вне допуска при откалиброванной конфигурации. Проём 1,2 м, плотность 0,1 м²/м²: 17,4 с при аналитическом значении 14,97 с (+16,0 %). Расхождение создаёт аналитическая схема, а не предел: условие скопления не выполняется (13,4 < 19,6), проём вдвое уже участка в ней не учитывается, и время равно времени открытого торца. В расчёте задержки у проёма ничем не компенсируются. В задаче 11-2 при той же геометрии и вдвое большем числе людей аналитическое время больше в 3,8 раза, и режим УАМ совпадает с ним в пределах 0,5 %.

Два ограничения при толковании результата. Задачи с малым числом людей чувствительны к расстановке: размах по трём расстановкам достигает 5,3 % времени в задаче 1-2 и 4,7 % в задаче 6-2, а в серии 0,8 м не превышает 0,6 %. В серии 2,0 м совпадение достигается по сечению, а не по ходу движения: время определяется торцом, через который проходит интенсивность подошедшего потока.

Г3.4 Выводы

На задачах пособия проверено, воспроизводит ли ядро аналитическое решение упрощённой аналитической модели приложения № 6 методики при разных плотностях расстановки и трёх ширинах

выхода. При базовой конфигурации в допуск входит одна задача: на открытом торце расчётное время эвакуации больше аналитического и даёт оценку сверху, на узких проёмах оно меньше и даёт оценку снизу, кроме одной задачи с самым плотным размещением перед проёмом. Причина в том, что постоянный предел потока проёма применяется и к узким проёмам, где ветвь табл. П2.8 даёт меньшее значение, и к торцу без проёма, для которого методика предела не назначает. При откалиброванной конфигурации предел вычисляется по ходу расчёта по формулам приложения № 6 и табл. П2.8, и в допуск входят все задачи, кроме одной, в которой аналитическая схема не учитывает проём вдвое уже участка, поскольку условие скопления в ней не выполняется. Расчётное время эвакуации в режиме УАМ больше, чем при базовой конфигурации. Ограничение применения: в рассмотренных постановках режим УАМ воспроизводит аналитическое решение, но предписанная методикой интенсивность при скоплении на узких проёмах в несколько раз ниже измеренной в натурных экспериментах (приложения Г6, Г7, Г9, Г11), поэтому для сопоставления с экспериментальными данными он не применяется.

Приложение Г4. Задачи пособия Академии ГПС на слияние потоков (задачи 28–42)

Г4.1 Источник и данные

Слияние двух людских потоков на общем участке пути – единственное явление, для которого учебное пособие Академии ГПС МЧС России даёт готовое аналитическое решение с числовым ответом по каждой задаче. Задачи пособия взяты в документ для проверки того, образуется ли в расчёте скопление перед общим участком и согласуется ли время его рассасывания с решением упрощённой аналитической модели.

Пятнадцать задач 28-2…42-2 составляют § 2.4 «Слияние людских потоков на горизонтальном участке» пособия [10], единственную часть его тестового набора со слиянием. Значения для сравнения получены авторами пособия аналитически по формулам (2.4–2.6). Установленный ими допуск равен ±10 %. Сравнивается время выхода последнего человека. Формулы и таблицы пособия действуют и в текущей методике [1] (приложения № 2 и № 6), поэтому сравнение относится к верификации, и допуск документа для него ±10 %.

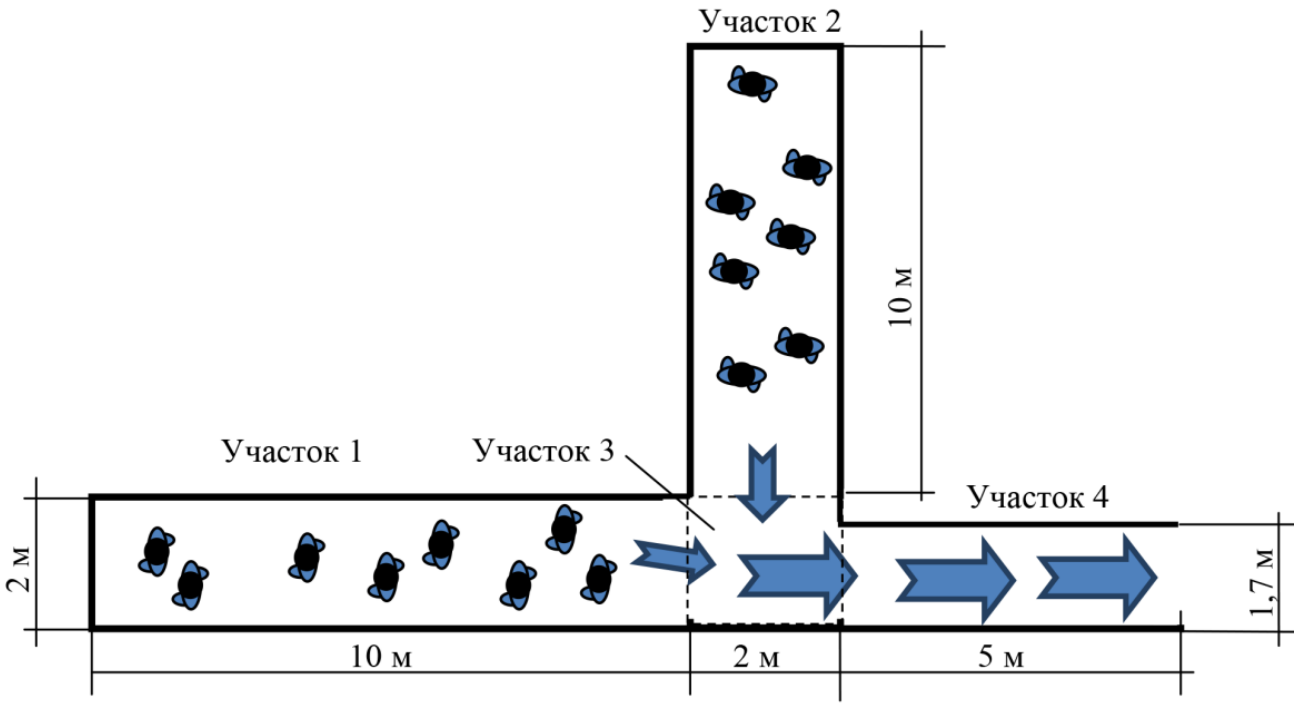


Рисунок 120. Расчётная схема: участки 1 и 2 по 10 × 2 м, узел слияния 2 × 2 м, общий путь 5 × 1,7 м с выходом в конце (по [10], рис. 2.4)

Ширины: b_1 = b_2 = b_3 = 2,0 м, общий путь b_4 = 1,7 м. Плотности расстановки даны в [10, табл. 2.7]. В серии № 1 (задачи 28-2…35-2) на участках 1 и 2 они одинаковые, 0,2…0,9 м²/м². Во второй серии (задачи 36-2…42-2) они разные, от 0,3/0,1 до 0,9/0,7. Численность людей в задачах составляет от 80 до 360 человек и приведена в таблице результатов.

Таблица 60. Построение аналитического решения пособия и его соответствие методике

Шаг расчёта пособия	Формула: пособие → методика [1]	Значения в задачах 28-2…42-2
интенсивность на участках 1 и 2	q = D·V(D), V по (П2.1), табл. П2.6 → (П2.2)	q_1, q_2 = 8,0…16,4 м/мин по плотности расстановки
интенсивность объединённого потока	$q_3 = (q_1 b_1 + q_2 b_2)/b_3$ – (2.4) → (П6.6)	22,3…32,7 м/мин при $b_1 = b_2 = b_3$ = 2,0 м
признак скопления в узле	$q_3 > q_{max}$ – (П6.7); q_{max} горизонтального пути 16,5 м/мин – табл. П2.8	выполняется во всех 15 задачах
время существования скопления	$t_{ск} = N \cdot f/(q_{Dmax} \cdot b_4)$ – (2.5) → (П6.13); q_{Dmax} горизонтального пути 13,5 м/мин	20,92…94,12 с при $N = N_1 + N_2$
переформирование на участок 4	$q_4 = q_3 b_3/b_4$ – (2.6) → (П6.4)	q_4 = 13,5·2,0/1,7 = 15,88 м/мин
время движения по участку 4	l_4/V_4, V_4 по интенсивности q_4	V_4 = 40 м/мин, l_4/V_4 = 7,50 с во всех задачах

Время зависит только от суммы $N_1 + N_2$, поэтому задачи двух серий попарно совпадают. Время определяет сечение b_4 = 1,7 м на входе в общий путь, где выпуск равен $q_{Dmax} \cdot b_4/(60 \cdot f)$ = **3,82 чел/с**. Выход в конце участка 4 в аналитической схеме поток не ограничивает.

Таблица 61. Что задано источником и чем восполнены недостающие данные

Что нужно модели	Что задано в пособии	Чем восполнено
геометрия участков	размеры на схеме постановки	сняты со схемы; сходятся с числами таблицы плотностей ($N \cdot f/D_{расст}$ = 20 м² на участках 1 и 2)
число людей и плотность расстановки	N_1, N_2 и $D_{расст}$ по двум сериям, м²/м²	переведены в чел/м² через f = 0,1 м²
параметры движения	скорости по приказу МЧС России от 30.06.2009 № 382, f = 0,1 м²	профиль М0-3 (летняя одежда) [1, табл. П2.6]
положение каждого человека	задана только средняя плотность участка	равномерно случайная расстановка, три начальных числа на задачу
время начала эвакуации	не оговорено	0 у всех
аналитическое решение и допуск	времена и допуск ±10 %	пересчитано по формулам приложений № 2 и № 6 [1], перечисленным выше; расхождение с пособием не более 0,02 %

Полнота выхода проверена отдельно: во всех 90 расчётах через выход прошло ровно $N_1 + N_2$ человек.

Г4.2 Расчётная модель и конфигурации расчёта

Модель собрана из трёх узлов. Перпендикулярно «Участку 1+3» 12 × 2 м лежит «Участок 2» (2 × 10 м). Общий путь образует «Участок 4» (5 × 1,7 м) с выходом во всю ширину. Профиль М0-3 [1, табл. П2.6], время начала эвакуации 0 у всех, расстановка равномерно случайная. Каждая задача рассчитана в трёх расстановках при каждой из двух конфигураций, итого 90 расчётов. В таблицах приведено среднее трёх расстановок. Удельный поток на сужении 2,0 → 1,7 м определяется в промежутке между 10 и 90 % людей, перешедших на участок 4.

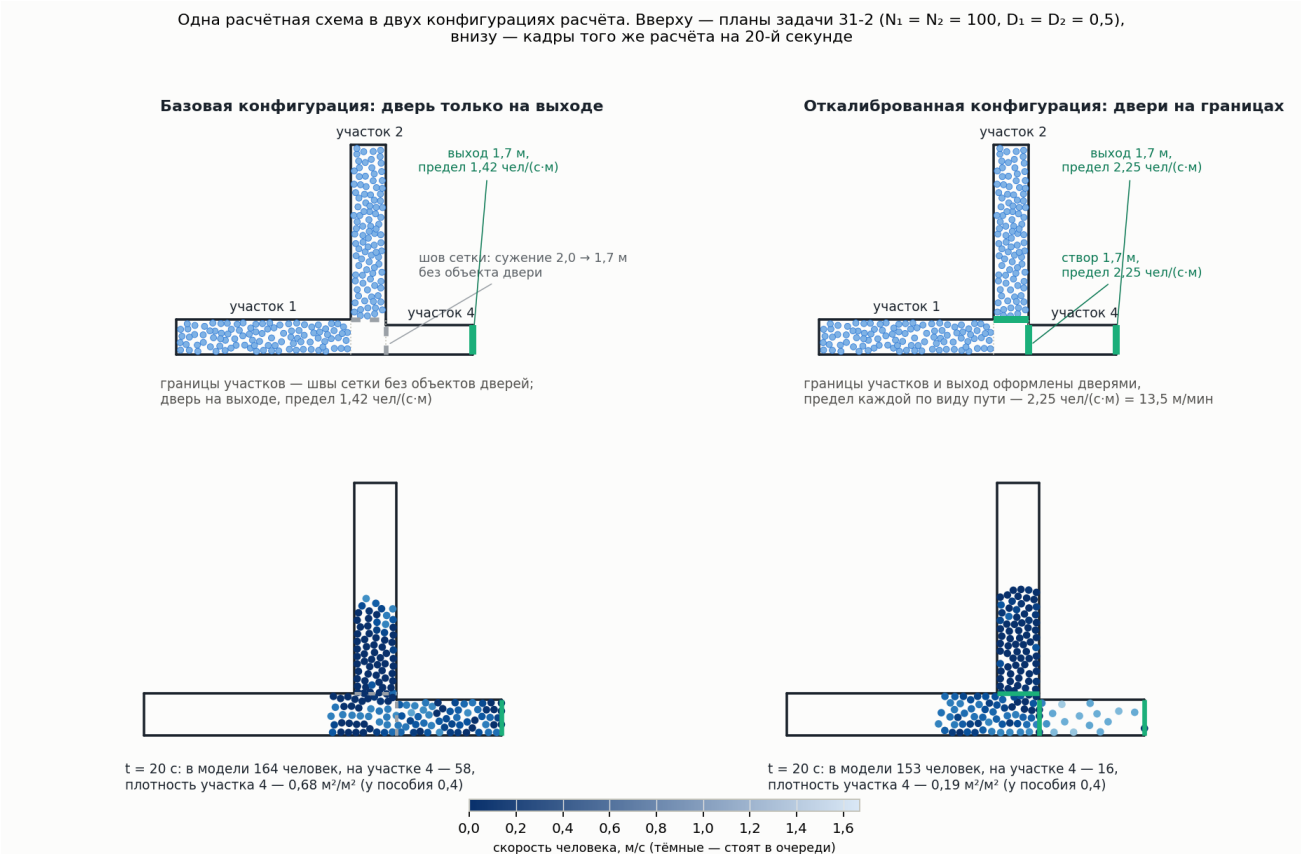


Рисунок 121. План модели задачи 31-2 и кадры расчёта: слева базовая конфигурация, где границы участков служат швами расчётной сетки, а дверь с пределом 1,42 чел/(с·м) стоит только на выходе. Справа откалиброванная конфигурация с дверями на границах и на выходе, предел 2,25 чел/(с·м)

Таблица 62. Конфигурации расчёта

Параметр	Базовая конфигурация	Откалиброванная конфигурация	Источник значения
границы узла слияния: участок 2 → узел и узел → участок 4	объектов дверей нет, узлы стыкуются по границам участков расчётной сетки	объекты дверей «Дверь 2-3» (b = 2,0 м) и «Дверь 3-4» (b = 1,7 м)	границы участков, на которых аналитическая схема переформирует поток – (П6.4), (П6.6) [1]
предел потока этих створов	не действует: очередь на границе участков не образуется, сужение проходится по правилам движения	2,25 чел/(с·м) у каждого	строка «горизонтальный путь» табл. П2.8 [1]: 13,5/(60·0,1) = 2,25
выход в конце участка 4	объект двери b = 1,7 м, предел **1,42 чел/(с·м)**	тот же объект двери, предел 2,25 чел/(с·м): значение задано один раз и действует на всех трёх створах	строка «дверной проём» табл. П2.8 [1] при b ≥ 1,6 м: 8,5/(60·0,1) = 1,42
профиль группы мобильности	М0-3 (летняя одежда), табличные параметры	тот же	[1, табл. П2.3, П2.6]
режим УАМ	выключен	выключен	–
геометрия, расстановка, время начала эвакуации, число расчётов	одни и те же	одни и те же	–

Выход из расчётной области оформлен дверью с пределом 1,42 чел/(с·м) по общему правилу документа, как торец участка в задачах 1-2…9-2 приложения Г3. Границы расчётных участков внутри пути дверями не оформляются, поскольку объект «дверь» задаётся в стене с проёмом (раздел 2.6).

Откалиброванная конфигурация построена по условиям аналитической задачи. В решении пособия поток на границе участков при скоплении ограничен интенсивностью при максимальной плотности горизонтального пути q_{Dmax} = 13,5 м/мин по формуле (П6.13). В модели движения предел действует только на створе с объектом «дверь». Границы участков оформлены дверями, а предел всех створов задан по виду пути отношением 13,5/(60·0,1). Он равен 2,25 чел/(с·м). Тем же значением ограничен выход, поэтому очереди перед ним, которой в аналитической схеме нет, не возникает.

Г4.3 Результаты и анализ

Δ = расчёт − аналитическое решение пособия, среднее по трём расстановкам. В скобках приведено то же в процентах эталонного времени.

Таблица 63. Время выхода последнего человека по 15 задачам

Задача	N_1 + N_2	Аналитическое решение, с	Базовая: t, с	Базовая: Δ, с (%)	Базовая: в допуске ±10 %	Откалиброванная: t, с	Откалиброванная: Δ, с (%)	Откалиброванная: в допуске ±10 %
28-2	80	28,42	37,90	+9,48 (+33,4 %)	нет	29,8	+1,38 (+4,9 %)	да
29-2	120	38,87	54,38	+15,51 (+39,9 %)	нет	40,4	+1,53 (+3,9 %)	да
30-2	160	49,33	70,96	+21,63 (+43,8 %)	нет	52,6	+3,27 (+6,6 %)	да
31-2	200	59,79	87,43	+27,64 (+46,2 %)	нет	63,6	+3,81 (+6,4 %)	да
32-2	240	70,25	104,28	+34,03 (+48,4 %)	нет	77,9	+7,65 (+10,9 %)	нет
33-2	280	80,70	120,70	+40,00 (+49,6 %)	нет	86,2	+5,50 (+6,8 %)	да
34-2	320	91,16	137,27	+46,11 (+50,6 %)	нет	97,2	+6,04 (+6,6 %)	да
35-2	360	101,62	153,70	+52,08 (+51,2 %)	нет	109,2	+7,58 (+7,5 %)	да
36-2	80	28,42	37,93	+9,51 (+33,5 %)	нет	29,9	+1,48 (+5,2 %)	да
37-2	120	38,87	54,33	+15,46 (+39,8 %)	нет	40,8	+1,93 (+5,0 %)	да
38-2	160	49,33	70,68	+21,35 (+43,3 %)	нет	52,4	+3,07 (+6,2 %)	да
39-2	200	59,79	87,49	+27,70 (+46,3 %)	нет	64,0	+4,21 (+7,0 %)	да
40-2	240	70,25	103,98	+33,73 (+48,0 %)	нет	75,4	+5,15 (+7,3 %)	да
41-2	280	80,70	120,97	+40,27 (+49,9 %)	нет	86,3	+5,60 (+6,9 %)	да
42-2	320	91,16	137,24	+46,08 (+50,5 %)	нет	98,6	+7,44 (+8,2 %)	да

Таблица 64. Сводка по двум конфигурациям расчёта

Конфигурация расчёта	Серия № 1	Серия № 2	Ср. модуль Δ	В допуске ±10 %	Поток на сужении, чел/(с·м)	D_4, м²/м²
аналитическое решение пособия	–	–	–	–	2,25	0,40
базовая	**+33,4…+51,2 %**	**+33,5…+50,5 %**	**45,0 %**	**0 из 15**	2,175 (1,635…3,218)	0,599
откалиброванная	+3,9…+10,9 %	+5,0…+8,2 %	6,6 %	14 из 15	2,079 (1,944…2,180)	0,213

Расчётное время эвакуации больше аналитического во всех 15 задачах при обеих конфигурациях, и это оценка сверху расчётного времени эвакуации. Расчёт, как и аналитическое решение, зависит только от суммы $N_1 + N_2$, поэтому результаты двух серий не различаются. Размах по трём расстановкам составляет 0,1…1,7 % времени при базовой конфигурации и 0,5…5,7 % при откалиброванной, что меньше расхождения с аналитическим решением.

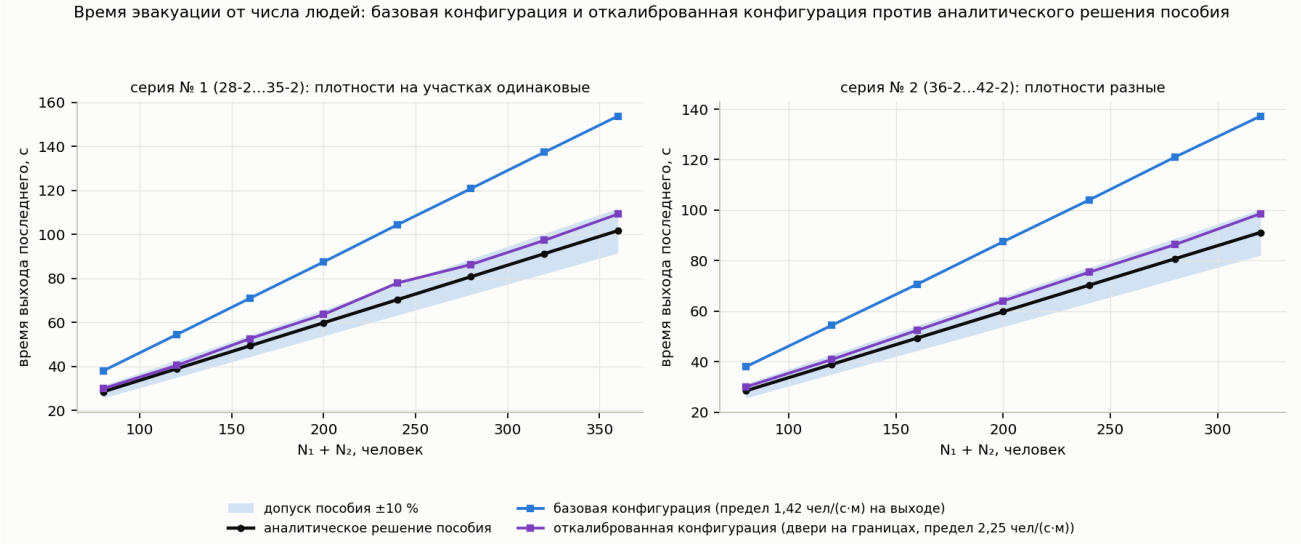


Рисунок 122. Время выхода последнего человека от суммы $N_1 + N_2$. Аналитическое решение пособия дано с полосой допуска ±10 %. Базовая конфигурация имеет дверь с пределом 1,42 чел/(с·м) на выходе. В откалиброванной двери стоят на границах участков при пределе 2,25 чел/(с·м)

При базовой конфигурации узким местом становится дверь на выходе. Поток через неё равен заданному пределу 1,42 чел/(с·м) с размахом 1,415…1,422 по 45 расчётам. Аналитическая схема пропускает через то же сечение 2,25 чел/(с·м). Перед дверью на всём общем пути образуется очередь, которой в решении пособия нет. Последний человек проходит участок 4 за 24,22 с при эталонных 7,50 с, а плотность на нём равна 0,599 против 0,40 м²/м². На сужении 2,0 → 1,7 м, где объекта двери нет, поток составляет 2,175 чел/(с·м). От заложенных в решение 2,25 чел/(с·м) это 96,7 %, и расхождение создаёт нижележащий створ, а не сужение.

При откалиброванной конфигурации сохраняется остаточное расхождение. Поток на сужении составляет 2,079 чел/(с·м). Он остаётся ниже заданного предела 2,25 чел/(с·м) из-за простоев створа. Положительное отклонение создаёт завершающая стадия выхода. Плотность участка 4 составляет 0,213 вместо 0,40 м²/м², а проход общего пути последним человеком занимает 4,3…4,4 с против 7,50 с. Подход головы потока к узлу слияния за 1,7…1,8 с в аналитической схеме отсутствует.

Таблица 65. Составляющие времени в задаче 31-2 (N = 200), с

Конфигурация расчёта	Подход головы потока	Выпуск очереди через сужение	Проход общего пути последним	Итого	D_4, м²/м²	Поток на сужении, чел/с
аналитическое решение пособия	–	52,30	7,50	59,79	0,40	3,82
базовая	1,40	61,80	24,22	87,43	0,650	3,38
откалиброванная	1,8	57,3	4,4	63,6	0,222	3,54

Те же составляющие в задаче 35-2 при N = 360: при базовой конфигурации 1,33 / 126,87 / 25,50 с, сумма 153,70 с и D_4 0,723. При откалиброванной 1,7 / 103,2 / 4,3 с, итого 109,2 с и D_4 0,220.

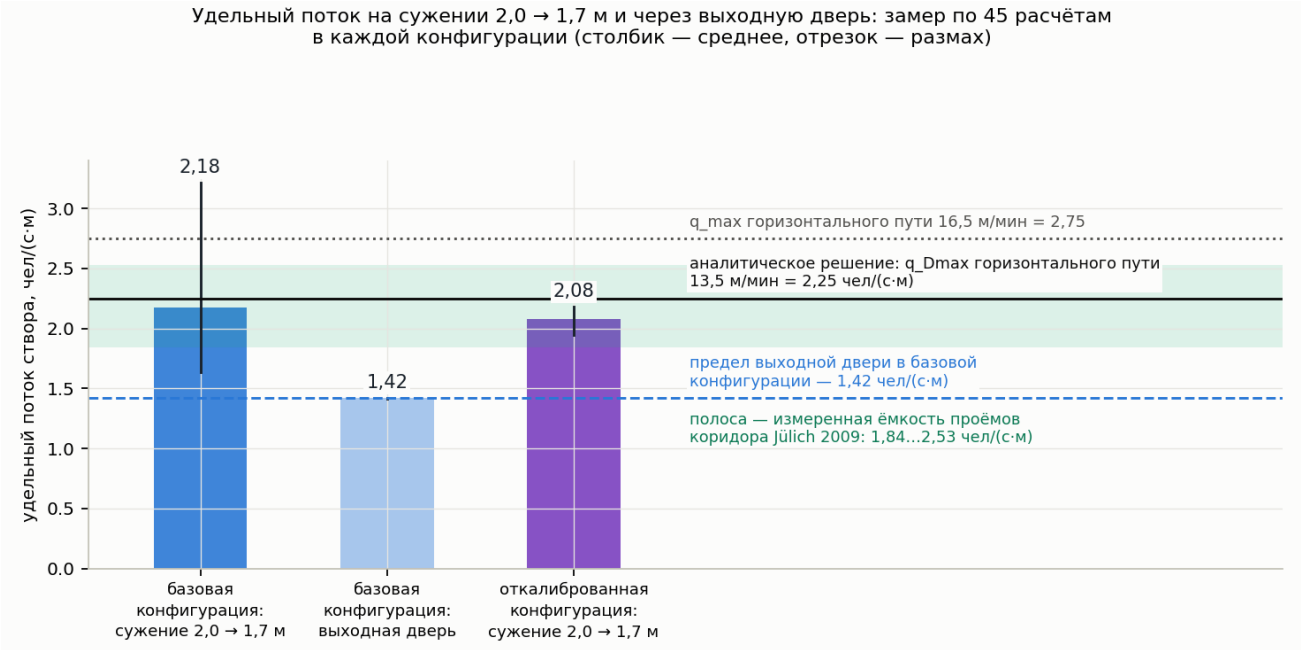


Рисунок 123. Удельный поток на сужении 2,0 → 1,7 м и через выходную дверь: среднее по 45 расчётам каждой конфигурации и размах. Горизонталь 2,25 чел/(с·м) отвечает аналитическому решению. Вторая горизонталь показывает предел двери 1,42 чел/(с·м)

Измеренные в экспериментах ёмкости створов лежат и выше, и ниже заложенных в решение 2,25 чел/(с·м). В приложениях Г6 и Г9 это 1,84…2,53 и 1,46…3,63 чел/(с·м). Происхождение предела 1,42 чел/(с·м) разобрано в разделе 2.6.

Не воспроизводится механизм уменьшения потока при скоплении: заданный предел воспроизводит величину выпуска через створ, но не её зависимость от плотности подошедших людей.

Г4.4 Выводы

При базовой конфигурации расчётное время выхода последнего человека больше аналитического решения пособия во всех задачах слияния, и по этой схеме расчёт даёт оценку сверху; в допуск не входит ни одна задача. Причина в том, что узким местом становится дверь на выходе из расчётной области с нормативным пределом потока проёма, а ограничение потока по виду пути на границах участков, предусмотренное формулой (П6.13), в модели движения без объектов дверей не возникает. При откалиброванной конфигурации двери стоят на границах участков и на выходе с пределом по виду пути из строки «горизонтальный путь» табл. П2.8 [1], заложенным в само аналитическое решение.

Ограничение применения: предел по горизонтальному пути выше предела дверного проёма и на схемы с дверными проёмами не переносится. Оформление границ расчётных участков дверями отвечает условиям аналитической задачи и не служит способом построения моделей зданий.

Приложение Г5. Тесты IMO MSC.1/Circ.1533 и NIST TN 1822: тест IMO 9

Г5.1 Источник и данные

Циркуляр IMO MSC.1/Circ.1533 [6], приложение 3, добавление 2, задаёт двенадцать задач с критериями приёмки для программ расчёта эвакуации с судов, а записка NIST TN 1822 [41] описывает семнадцать тестов Verif. 1.1…5.2 для зданий. На обоих наборах построен стандарт ISO 20414 [5]. Двадцать восемь тестов из двадцати девяти проверены в приложениях Г1 и Г2 либо не проводятся из-за отсутствующих компонентов. Соответствие «тест источника → где проверен» приведено в таблице ниже. Она же служит указателем по всему документу. Здесь разобран не покрытый другими приложениями тест **IMO 9**.

Таблица 66. Соответствие 29 тестов IMO, NIST и ISO 20414, глава документа и результат

Проверяемое свойство	IMO · NIST · ISO	Раздел документа	Результат
назначение времени начала эвакуации	5 · 1.1 · 1	«Представление человека и исходные условия»	соответствует
скорость свободного движения в коридоре	1 · 2.1 · 2	«Движение в помещениях и коридорах»	+0,7 с
скорость движения по лестнице вверх и вниз	2, 3 · 2.2 · 3	«Лестницы и пандусы»	+0,8 / 0,0 % по скорости
проход угла без выхода за границы	6 · 2.3 · 4	«Взаимодействие людей и обход препятствий»	зазор 0,1399 м
совокупность скоростей, назначенных по распределению	7 · 2.4 · 5	«Представление человека и исходные условия»	соответствует
встречные потоки в коридоре	8 · 2.8 · 6	«Взаимодействие людей и обход препятствий»	монотонный рост; сопоставление на моделях заказчика – Д.5
маломобильный человек в потоке	– · 2.10 · 7	«Взаимодействие людей и обход препятствий», «Движение маломобильных людей»	+16,4 %: сценарий 1 позже сценария 2
назначение выхода	10 · 3.1 · 8	«Выбор выхода и маршрута»	23 из 23
динамическая доступность выхода	– · 4.1 · 9	«Выбор выхода и маршрута»	0 %
скопление перед лестницей	11 · 5.1 · 10	«Лестницы и пандусы»	цепочка скоплений получена
наибольший поток через проём	4 · 5.2 · 11	«Проёмы и сужения»	−0,7 % к заданному пределу
связь потока, плотности и скорости	12 · – · 13	«Движение в помещениях и коридорах»	−8,5…+2,9 %
рассредоточение агентов из зала: вдвое меньше дверей	9 · – · –	«Выбор выхода и маршрута»	отношение времён 2,00 и 1,99 при требуемом 2,00
выбор маршрута по геометрии	– · – · 17	«Выбор выхода и маршрута»	3 варианта геометрии из 3
снижение скорости в дыму	– · 2.5 · 18	–	не проводится: источник видимости не подключён
потеря дееспособности	– · 2.6 · 19	–	не проводится: компонент отсутствует
лифты	– · 2.7 · 20	–	не проводится: логики лифта в решателе нет
групповое движение	– · 2.9 · 14	–	не проводится: есть только сопровождение немобильного человека
социальное влияние на выбор выхода	– · 3.2 · 15	–	не проводится: выбор выхода детерминирован
привязанность к знакомому выходу	– · 3.3 · 16	–	не проводится: подмодели привязанности нет

Постановка теста IMO 9 [6, прил. 3, п. 15]. Зал 30 × 20 м, четыре двери шириной b = 1,0 м, 1000 человек равномерно в центральной зоне 26 × 16 м, каждый уходит ближайшим выходом. На первом шаге замеряется время выхода последнего человека при четырёх открытых дверях, на втором – то же при

двух. Ожидаемый результат есть **примерно удвоение времени опорожнения зала**. Тест проверяет, что уменьшение числа выходов вдвое отзывается в расчёте пропорциональным ростом времени: оно определяется их пропускной способностью, а не устройством подхода к ним. Совокупность людей – мужчины 30–50 лет [6, табл. 3.4 прил. 3]: V_0 равномерно 0,97…1,62 м/с, время начала эвакуации 0. Численного допуска источник не назначает, эталонное отношение равно 2,00. Отклонение оценивается по допуску документа для верификации ±10 %.

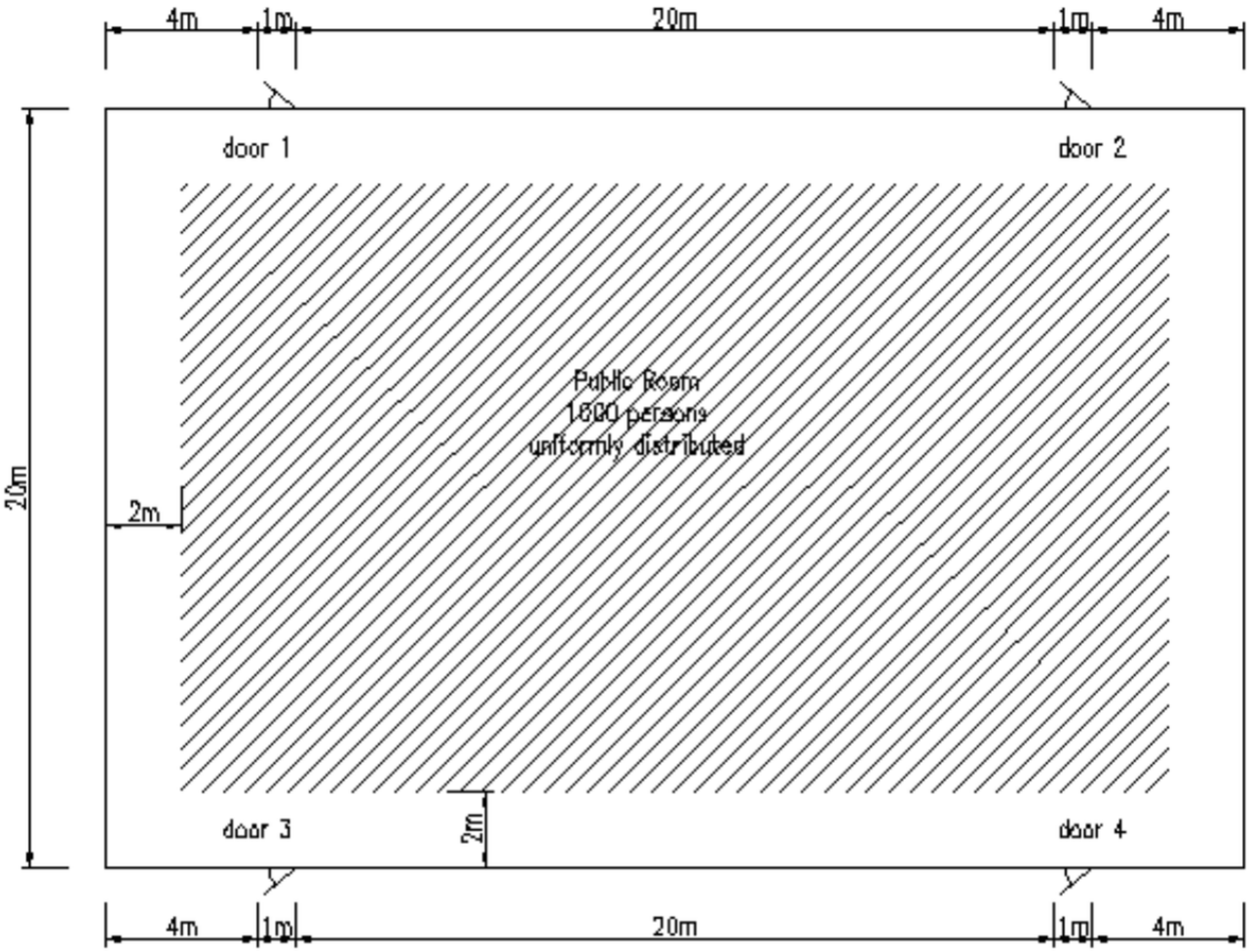


Figure 3: Exit flow from a large public room

Рисунок 124. Постановка теста IMO 9: зал с четырьмя выходами и 1000 человек, равномерно распределённых (по [6], рис. 3 прил. 3)

Данные полны по построению с одной оговоркой: размещение четырёх дверей по стенам зала циркуляр не задаёт.

Таблица 67. Полнота данных теста IMO 9

Что требуется для воспроизведения	Тест IMO 9
геометрия	зал 30 × 20 м и ширина дверей b = 1,0 м заданы; **размещение четырёх дверей по стенам не задано**
состав совокупности, скорости, начальные условия	заданы (Г5.1)
определение измеряемой величины, критерий приёмки	заданы: время выхода последнего человека; примерно удвоение времени
разброс по расстановкам	источником не оговаривается; выполнено по два расчёта со сменой расстановки, размах 0,2 % (четыре двери) и 0,4 % (две двери)
оценка полноты	**данные полны с одной оговоркой – размещение дверей**

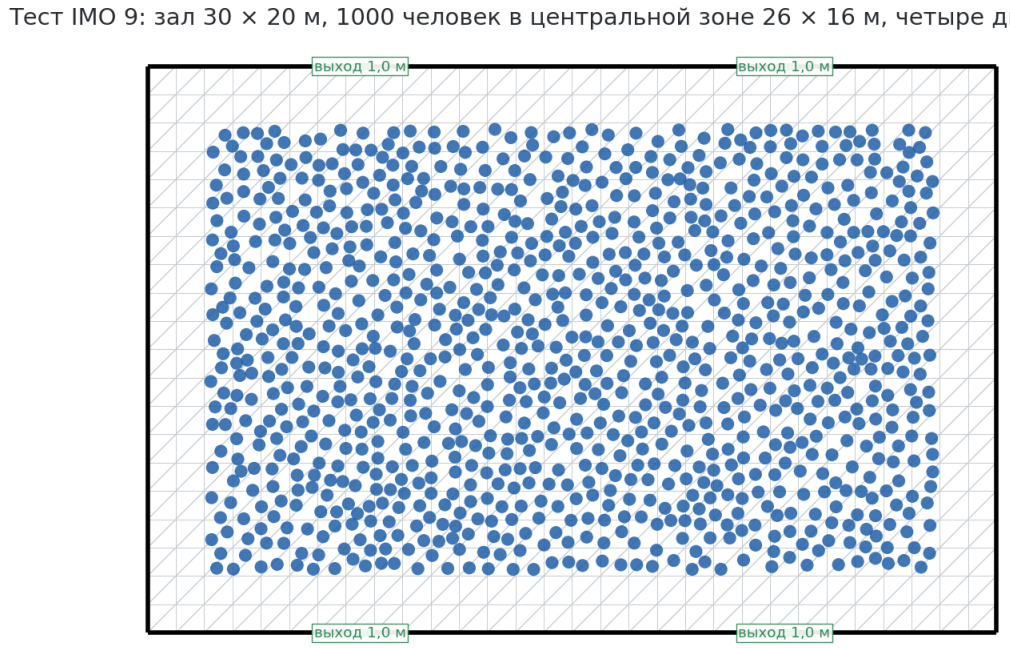
Г5.2 Расчётная модель и конфигурации расчёта

Геометрия, численность и скорости взяты из постановки циркуляра (Г5.1). Профиль здесь задан условиями теста, а не взят из библиотеки. Сверх постановки задано размещение дверей: по две на каждой длинной стене симметрично центру зала, поэтому шаг 2 образуется из шага 1 закрытием одной пары. Плотность расстановки $D_{расст}$ = 2,4 чел/м². На каждый шаг приходится по два расчёта, итого четыре.

Таблица 68. Конфигурации расчёта

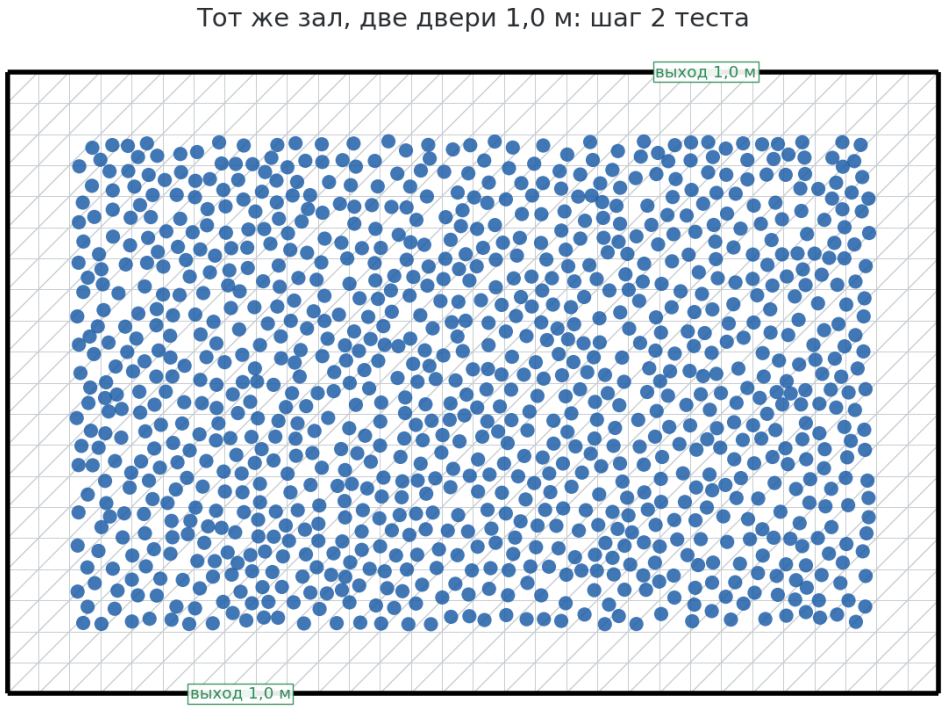
Параметр	Базовая конфигурация	Откалиброванная конфигурация	Источник значения
предел потока проёма	1,42 чел/(с·м) на всех створах при выключенном режиме УАМ	не требуется	значение предела – [1, табл. П2.8]; постановка теста предела не назначает [6]
скорость свободного движения, время начала эвакуации	V_0 равномерно 0,97…1,62 м/с; 0	не требуется	[6, табл. 3.4 и п. 15 прил. 3]
геометрия, число человек, расстановки	зал 30 × 20 м, 1000 человек, две расстановки на шаг	не требуется	[6]; число расстановок источником не оговорено

Откалиброванная конфигурация в этом тесте не требуется, и причина в устройстве самого критерия: он есть отношение двух расчётных времён одной и той же модели, а не измеренная в опыте величина. Заменять параметры значениями, измеренными в опыте, здесь не на что: опыта нет, а абсолютных времён циркуляр не нормирует. Критерий выполняется при базовой конфигурации (Г5.3).



Модель собрана по описанию постановки циркуляра. Расположение дверей в циркуляре задано рисунком без размеров; принято по две двери на каждой длинной стене.

Рисунок 125. План модели: зал 30 × 20 м, 1000 человек в центральной зоне 26 × 16 м, четыре двери 1,0 м



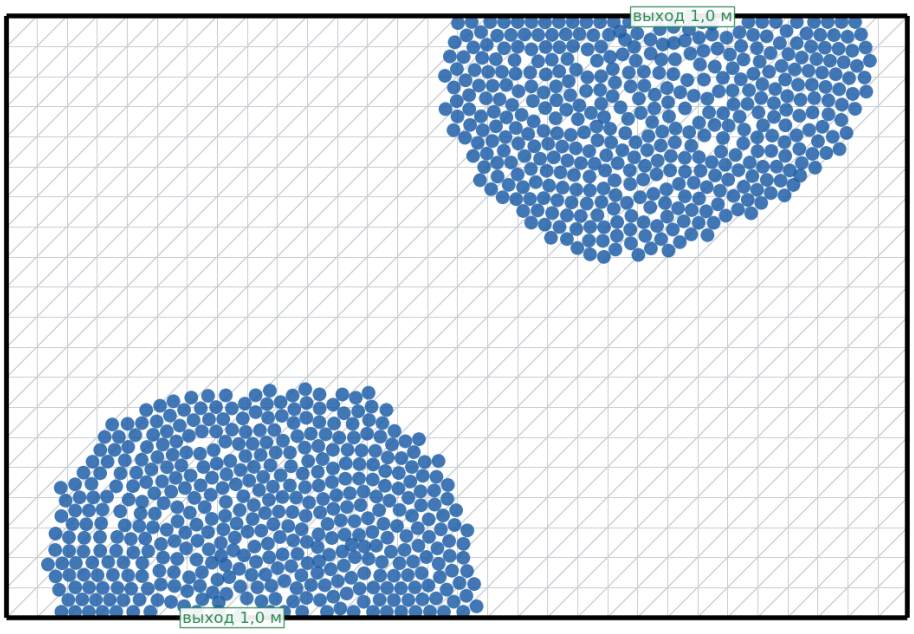
Оставлена центрально-симметричная пара дверей.

Рисунок 126. Тот же зал с двумя дверями на шаге 2 теста: оставлена центрально-симметричная пара



Кадр расчёта в базовой конфигурации копией сборки ядра.

Рисунок 127. Кадр расчёта, четыре двери: очереди у всех четырёх створов



Кадр расчёта в базовой конфигурации копией сборки ядра.

Рисунок 128. Кадр расчёта, две двери: те же люди собираются у двух створов

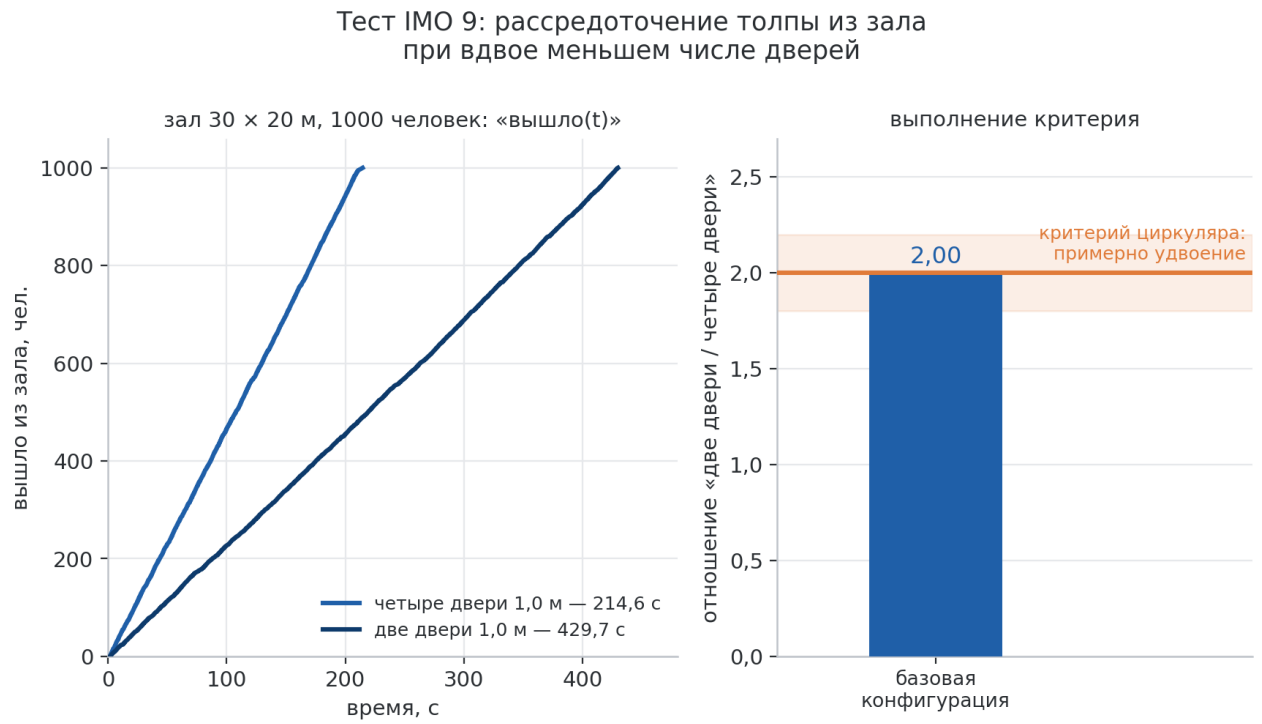
Г5.3 Результаты и анализ

Таблица 69. Время выхода последнего человека, тест IMO 9

Шаг	Открыто дверей	Базовая конфигурация, с
1	четыре по 1,0 м	**214,6** и 214,9 по двум расстановкам
2	две по 1,0 м	**429,7** и 427,9
отношение «шаг 2 / шаг 1»	–	**2,00** и 1,99

Таблица 70. Выполнение критерия источника

Критерий источника	Базовая конфигурация	Прошёл
«примерно удвоение времени опорожнения зала» [6, прил. 3, п. 15]	отношение **2,00** и 1,99 при ожидаемых 2,00; расхождение с точным удвоением не более 0,5 %	**да**



Постановка — IMO MSC.1/Circ.1533, приложение 3, тест 9: зал с четырьмя выходами и 1000 человек, равномерно распределённых в центральной зоне; затем два выхода закрываются. Ожидаемый результат — примерно удвоение времени опорожнения зала.

Рисунок 129. Тест IMO 9: число вышедших из зала по времени при четырёх и при двух дверях и отношение времён против критерия циркуляра при базовой конфигурации с пределом потока проёма 1,42 чел/(с·м). По оси абсцисс время, с, по оси ординат число людей

Числовой эталон здесь производный: это удвоенное расчётное время шага 1 той же расстановки, именно его нормирует циркуляр. Расчётное время шага 2 отличается от него на +0,5 и −2,0 с (+0,1 и −0,5 % при производном эталоне 429 и 430 с): **в допуске ±10 % два сравнения из двух**. При двух дверях эвакуация удлиняется вдвое: в 2,00 и 1,99 раза. Сравнение построено на двух расчётных временах одной и той же модели, поэтому в общие итоги документа оно не входит и приводится отдельно. Разброс по расстановкам 0,3 и 1,8 с.

Причина отклонения от точного удвоения одна. Поток каждого створа ограничен пределом большую часть расчёта, и время опорожнения зала определяется суммарным потоком открытых створов, а не длиной подхода к ним. При уменьшении числа дверей вдвое суммарный поток падает во столько же раз, а время подхода первого человека к створу прибавляется к обоим шагам одинаково, поэтому отношение близко к двум: 2,00 и 1,99. Предел потока проёма уменьшает выпуск створа одинаково при четырёх и

при двух дверях и из отношения сокращается. Проверяемая величина отличается от 2,00 не более чем на 0,5 % притом, что абсолютные времена меняются на 20,2…23,1 %. Об этом говорит раздел 2.6. Выполнение критерия источника заданием предела потока проёма не определяется.

Г5.4 Выводы

Тест IMO 9 – единственный из тестов IMO, NIST и ISO 20414, который проводится, но не входит в приложения Г1 и Г2. Он пройден: при базовой конфигурации время опорожнения зала при двух дверях относится ко времени при четырёх как удвоение, чего и ожидает циркуляр, и оба сравнения лежат в допуске. Откалиброванная конфигурация не требуется: критерий есть отношение двух расчётных времён одной модели, измеренных величин постановка не содержит, и заменять в расчёте нечего. Малое отклонение от точного удвоения объясняется временем подхода первого человека к створу, которое прибавляется к обоим шагам одинаково, тогда как суммарная пропускная способность дверей уменьшается ровно вдвое. Ограничение применения: в рассмотренных постановках абсолютные времена циркуляр не нормирует, они зависят от размещения дверей, которое источником не задано, поэтому проверено только отношение времён.

Приложение Г6. Опыты Jülich: казарма Дюссельдорф 2006 и коридор 2009

Г6.1 Источник и данные

Приложение содержит валидацию модели движения по двум лабораторным опытам группы Forschungszentrum Jülich: в них измерено, как людской поток проходит через дверной проём и по коридору между двумя проёмами. Опыты включены в документ потому, что проём – самое узкое место пути эвакуации, и время выхода людей из помещения определяется его пропускной способностью. Среди опубликованных данных такого рода эти два опыта наиболее полны: даны траектории каждого участника (съёмка 25 и 16 кадров в секунду), геометрия, число людей и порядок проведения [27;28;29;30;35]. Оба опыта устроены по схеме «зона ожидания → 4 м подхода → проём». Коридор добавляет к этому движение между двумя проёмами: кривую «скорость–плотность». Сравнивается 41 точка: 13 опытов казармы и 28 постановок коридора. Допуск валидации ±20 % (раздел 1.4). Для сведения приводятся меры критерия ISO 20414: ERD ⩽ 0,45, EPC 0,6…1,4, SC ⩾ 0,6 [5;43] (раздел 1.5).

Данные обоих опытов опубликованы: траектории, геометрия и метаданные выложены в архиве Forschungszentrum Jülich под лицензией CC BY 4.0 [35], поэтому сравнение воспроизводимо по открытым источникам и не опирается на сведения, переданные авторами частным порядком.

Казарма Дюссельдорф 2006 [28;29;35]. Bergische Kaserne, ноябрь 2006 г., солдаты, 170…179 человек: из зоны ожидания при плотности 2,6 чел/м² в зале шириной 7 м по команде идут 4 м до проёма b × l и проходят его. Момент команды и зона ожидания в запись не попали, поэтому время во всех сравнениях отсчитывается от прохода первого человека через створ входа. Опытов 13: десять с b = 0,9…2,5 м при l = 4 м и три с l = 0,06 / 2 / 4 м при b = 1,2 м.

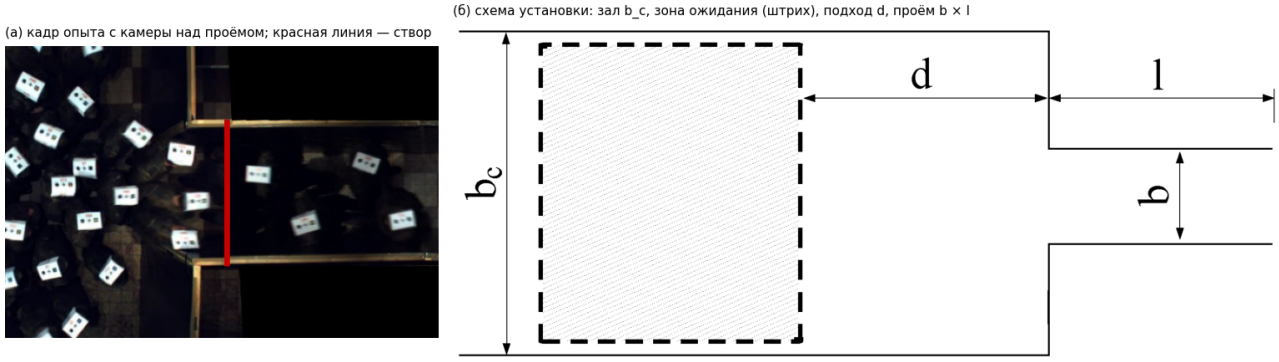


Рисунок 130. Опыт «казарма Дюссельдорф 2006»: (а) кадр с камеры над проёмом; (б) схема установки: зал 7 м, подход 4 м, проём b × l (по [28], рис. 2)

Коридор Jülich 2009 [30;35]. Зал 2 ярмарки Дюссельдорфа, май 2009 г., серия Hermes. В основном студенты (25 ± 5,7 года, рост 1,76 ± 0,09 м), 61…351 человек, инструкция «идти целенаправленно, без спешки». Через вход $b_{вх}$ и 4 м зала подхода люди попадают в коридор длиной 8 м и шириной b = 1,8 / 2,4 / 3,0 м. В конце коридора расположен проём выхода $b_{вых}$. В 28 постановках менялись ширины коридора, входа 0,5…3,0 м и выхода 0,7…3,0 м. Поток задавал вход в 15 из них, выход в 10, сам коридор в 3. Кривая «скорость–плотность» строится источником по области измерения длиной 2 м в 2…4 м от выхода [33].

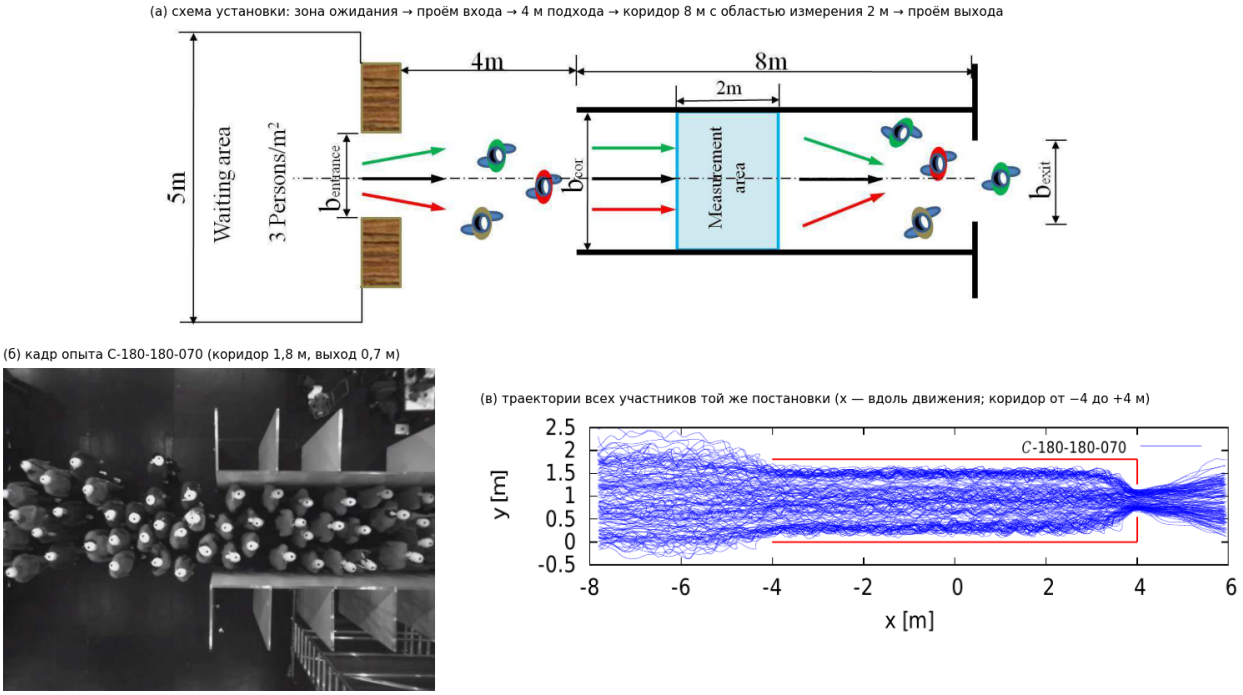


Рисунок 131. Опыт «коридор Jülich 2009»: (а) схема установки; (б) кадр постановки C-180-180-070; (в) траектории всех её участников (по [30], рис. 1 и 2)

Обозначения ширин: **b** – ширина проёма казармы. Тем же знаком обозначена ширина коридора, а **$b_{вх}$** и **$b_{вых}$** обозначают ширины проёмов его входа и выхода. Ширина зала казармы и длина её проёма обозначены **b_c** и **l**. Эталон сравнения – измеренные в опытах время прохода последнего человека через определяющий створ, удельный поток створа, плотность и скорость очереди перед ним. Все эти величины сняты с опубликованных траекторий той же обработкой, какой обрабатываются траектории расчёта.

Таблица 71. Экспериментальные величины двух опытов, снятые с опубликованных траекторий [35]

величина	казарма 2006 (13 опытов)	коридор 2009 (28 постановок)
человек в опыте	170…179	61…351
время прохода последнего через определяющий створ, с	34,4…106,7 (створ входа в проём)	51,4…160,4 (створ выхода из коридора)
ёмкость створа при длинном проёме l = 4 м, чел/(с·м)	1,75…2,12 при b = 0,9…2,5 м; линия J = 1,942·b	–
ёмкость короткого проёма в стене, чел/(с·м)	2,24 (l = 0,06 м, b = 1,2 м); 1,89 при l = 2 м	вход 2,26…2,53 ($b_{вх}$ = 0,5…1,44 м); выход 1,84…2,32 ($b_{вых}$ = 0,7…1,6 м)
удельный поток коридора без сужений, чел/(с·м)	–	1,58…1,65; максимум кривой «скорость–плотность» 1,81 при 1,69 чел/м², при D > 2 чел/м² поток убывает до 0,6
скорость свободного движения V_0, м/с	1,39 (подход первых людей, 3 231 замер)	1,546 (постановки малой плотности; публикация 1,55 ± 0,18)
плотность очереди перед створом, чел/м²	2,1…2,8 (полоса 0…1 м перед проёмом)	2,1…3,3 (область измерения при суженном выходе)
скорость в очереди, м/с	0,29…0,54	0,18…0,63
занятая ширина створа (5…95 % точек прохода)	0,65…0,81 от b	–

ЧТО ИСТОЧНИКОМ НЕ ЗАДАНО И ЧЕМ ВОСПОЛНЕНО

Оба опыта содержат полную геометрию, численность и поимённые траектории. В записи не попали момент подачи команды и зона ожидания, поэтому время в сравнениях отсчитывается от прохода первого человека через определяющий створ. Плотность расстановки принимается по схеме опыта. Ни один из двух источников не приводит антропометрию участников, поэтому площадь горизонтальной проекции в расчёте остаётся табличной.

Таблица 72. Что содержат и чего не содержат данные двух опытов

	казарма 2006	**коридор 2009**
что содержат	траектории всех 170…179 человек (25 кадр/с) от 2,5…3 м перед проёмом; геометрия и число людей по метаданным; времена прохода створов входа и выхода из проёма; плотность и скорость в полосах перед проёмом; интервалы между проходами; занятая ширина створа; скорость свободного движения на подходе (3 231 замер); четыре опубликованных числа для проверки обработки	траектории всех 61…351 человек (16 кадр/с) от стены входа; геометрия постановок по метаданным; времена прохода четырёх створов; кривая «скорость–плотность» четырьмя способами источника; удельные потоки входа и выхода; скорость свободного движения по постановкам малой плотности; шесть опубликованных чисел для проверки обработки
чего не содержат	момент команды и зона ожидания в запись не попали; инструкция участникам не опубликована; антропометрия группы не приведена	зоны ожидания в записи нет, её плотность известна только по схеме (3 чел/м²); момент команды не снят; ёмкости проёмов по постановкам источник не публикует – сняты с траекторий
как восполнено	сравниваются времена от первого прохода, потоки, плотности и скорости в установившейся фазе (10…90 % прошедших); плотность расстановки 2,6 чел/м² по метаданным	то же; плотность расстановки принята 2,5 чел/м², её влияние на время 0,2…1,5 %

Г6.2 Расчётная модель и конфигурации расчёта

Расчётная модель повторяет геометрию обоих опытов по метаданным архива (Г6.1): зону ожидания, зал подхода длиной 4 м и проём. В коридорном опыте добавлены коридор 8 м с проёмом выхода и зал за ним. Время начала эвакуации 0. Расстановка равномерно-случайная при плотности 2,6 чел/м² в казарме и 2,5 чел/м² в коридоре. Проёмы заданы объектами «дверь», режим УАМ выключен. Считается 41 постановка: 13 опытов казармы и 28 постановок коридора, в каждой конфигурации расчёта по пять расстановок на постановку. В таблицах приведено среднее по расстановкам.

Профиль базовой конфигурации – М0-3 (летняя одежда) предписан контингенту обоих опытов, здоровым взрослым группы М0, и классу функциональной пожарной опасности здания [1, табл. П2.3]. Параметры движения заданы табличными значениями методики [1, табл. П2.6].

Профиль откалиброванной конфигурации составлен из двух измеренных в опыте величин. Скорость свободного движения принята равной 1,55 м/с: столько измерено в коридоре 2009 по 42 участникам [30, § 2], а с траекторий постановок малой плотности снято 1,546 м/с. Кривая «скорость–плотность» задана таблицей по измеренной в том же опыте зависимости для однонаправленного потока: доля скорости свободного движения равна 1,000 при плотности 0; 0,871 при 0,5; 0,710 при 1,0; 0,581 при 1,5; 0,471 при 2,0; 0,387 при 2,5; 0,323 при 3,0; 0,271 при 3,5; 0,226 при 4,0; 0,194 при 4,5; 0,168 при 5,0 и 0,097 при 9,0 чел/м², между точками линейно. Площадь горизонтальной проекции оставлена табличной, 0,10 м², поскольку габарит участников ни один источник не приводит. Больше в профиле ничего не изменено. Профиль один на обе серии: кривая снята в коридоре 2009, а казарма 2006 – другой опыт той же группы и того же контингента, поэтому перенос профиля на неё служит независимой проверкой.

Профиль библиотеки методики для этих опытов не подходит. Категория условий движения назначается по обстановке, в которой идут люди, а скорость свободного движения служит её признаком (раздел 2.2);

строки табл. П2.6 методики – составы контингента при эвакуации во время пожара, и строки, отвечающей взрослым, идущим без спешки, среди них нет. Проверка подтверждает это числом: профиль М0-4, табличная скорость свободного движения которого 1,56 м/с ближе прочих к измеренной, даёт по двум сериям 39 точек из 41, но по узлам той же группы – 3 из 7 (приложениеГ8), и расчётное время эвакуации в нём меньше экспериментального в 27 точках из 41, до −20,8 %; М0-5 даёт 31 точку и 5 из 7, М0-6 – 15 и 5 из 7. Вместе со скоростью такой выбор меняет коэффициент a, порог D_0 и площадь проекции, то есть подменяет весь набор параметров. К самой табличной площади проекции результат малочувствителен: при f = 0,09 м² в допуск входят 32 точки из 41 и те же 7 узлов из 7.

Таблица 73. Конфигурации расчёта

Параметр	Базовая конфигурация	Откалиброванная конфигурация	Источник значения
профиль группы мобильности	М0-3 (летняя одежда): V_0 = 1,67 м/с, f = 0,10 м², диаметр проекции 0,357 м, проходной диаметр 0,280 м, кривая (П2.1) при a = 0,295 и D_0 = 0,51 чел/м²	профиль по измеренным V_0 и кривой: V_0 = 1,55 м/с, кривая «скорость–плотность» задана таблицей по измеренной, f = 0,10 м², диаметр проекции 0,357 м, проходной диаметр 0,280 м	базовая – контингент и класс функциональной пожарной опасности здания [1, табл. П2.3], параметры [1, табл. П2.6]; откалиброванная – скорость свободного движения и кривая «скорость–плотность» измерены в коридоре 2009 [30], площадь проекции и проходной диаметр табличные [1, табл. П2.5]
предел потока проёма	**1,42 чел/(с·м)** на объектах «дверь»	**не задаётся**	базовая – [1, табл. П2.8]; откалиброванная – ёмкость створов измерена в этих же опытах и составляет 1,75…2,53 чел/(с·м), то есть выше 1,42 (Г6.1)
режим УАМ	выключен	выключен	эталон – экспериментальные данные, а не решение упрощённой аналитической модели
расстановка	равномерно-случайная в зоне ожидания: 2,6 чел/м² (казарма), 2,5 чел/м² (коридор); пять расстановок на постановку	то же	плотность зоны ожидания по метаданным опытов [35]
отступление от методики	нет	требование табл. П2.8 [1] не применяется ни в одном створе; скорость свободного движения и кривая «скорость–плотность» взяты из опыта, а не из табл. П2.6	–

Ёмкость длинных проёмов казармы при l = 4 м растёт с шириной линейно: J = 1,942·b по 10 ширинам и 1,951·b по всем 13 опытам. Наклон составляет около 1,90 чел/(с·м) на метр ширины. То же значение получено группой Jülich на другой серии опытов [31]. Ёмкость коротких проёмов в стене выше, 2,04…2,53 чел/(с·м), и в откалиброванную конфигурацию вошло снятие ограничения, а не другое постоянное значение предела. Единый предел на уровне измеренной ёмкости не воспроизводит различие ёмкостей длинного и короткого проёмов.

Г6.3 Результаты и анализ

Сравниваются удельный поток определяющего створа и время прохода через него: T для последнего человека, T95 для 95 % людей. Отклонение Δ = расчётное значение − экспериментальное. По времени Δ

> 0 означает, что расчётное время эвакуации больше экспериментального: расчёт даёт оценку сверху. Доля точек в допуске ±20 % считается по времени.

Таблица 74. Согласование с экспериментальными данными по сериям (среднее по постановкам; ERD, EPC, SC – по векторам времён прохода створа)

опыт	конфигурация расчёта	время последнего, Δ, с (размах)	Δ, % (размах)	T95, Δ %	удельный поток створа, Δ %	ERD	EPC	SC	В допуске ±20 % по времени	ISO 20414
казарма 2006, 13 опытов	базовая (M0-3, предел 1,42 чел/(с·м))	+15,7…+48,6	+41,2 (+31…+74)	+45,3	−29,9	0,57	0,64	0,95	0 из 13	нет
	откалиброванная (профиль по измеренным V_0 и кривой, без ограничения)	−7,4…+10,3	+5,9 (−7…+21)	+7,6	−4,8	0,18	0,87	0,95	12 из 13	да
коридор 2009, 28 постановок	базовая (M0-3, предел 1,42 чел/(с·м))	+12,8…+99,8	+52,1 (+16…+75)	+51,9	−35,6	0,51	0,67	0,96	3 из 28	нет
	откалиброванная (профиль по измеренным V_0 и кривой, без ограничения)	0,0…+27,4	+15,2 (0…+31)	+15,8	−10,4	0,19	0,84	0,95	18 из 28	да

В базовой конфигурации расчётное время эвакуации больше экспериментального во всех 41 точке – это оценка сверху: +15,7…+48,6 с в казарме и +12,8…+99,8 с в коридоре, в среднем +27,9 с и +41,8 с, или +41,2 и +52,1 %. В допуске ±20 % 3 точки из 41: постановки коридора 180-180-180, 240-240-240 и 300-300-300, в которых ни вход, ни выход не сужены. Ни один опыт казармы в допуск не входит. Критерий ISO 20414 не выполнен ни в одной из двух серий.

В откалиброванной конфигурации в допуске ±20 % 30 точек из 41 (12 из 13 в казарме и 18 из 28 в коридоре), и критерий ISO 20414 выполнен в обеих сериях. Расчётная ёмкость створа при снятом пределе близка к измеренной: −4,8 % в первой серии и −10,4 % во второй. Расчётное время эвакуации больше экспериментального в 37 точках из 41 (до +30,9 %) и меньше в четырёх (до −6,9 %), поэтому оценка сверху по среднему сохраняется и здесь. Вне допуска один опыт казармы, b250 (+21,5 %), и десять постановок коридора, где поток задаёт узкий вход или узкий выход (+20,9…+30,9 %). Размах по расстановкам составляет 1,4…4,3 с в казарме и 0,5…13,8 с в коридоре.

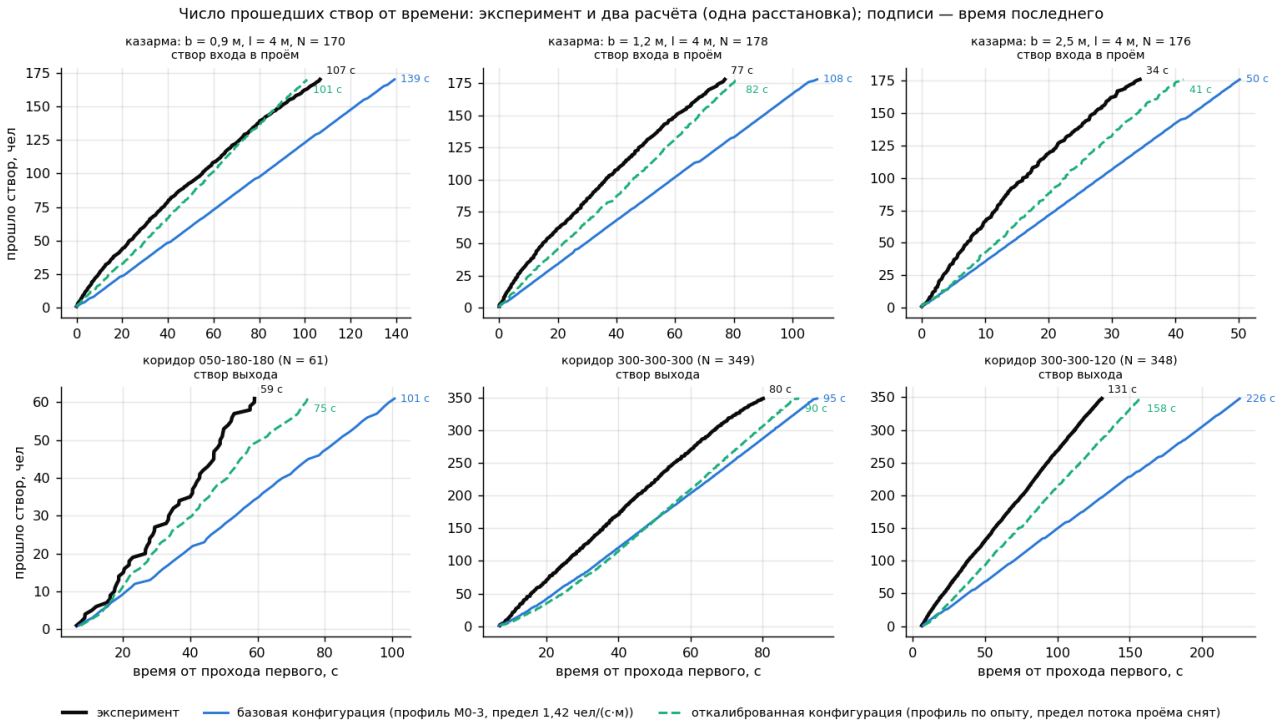


Рисунок 132. Число вышедших от времени: три опыта казармы b = 0,9 / 1,2 / 2,5 м и три постановки коридора при одной расстановке. Экспериментальные данные, базовая конфигурация с профилем M0-3 и пределом 1,42 чел/(с·м) и откалиброванная с профилем по измеренным V_0 и кривой «скорость–плотность», без ограничения потока проёма

Таблица 75. Казарма Дюссельдорф 2006 по опытам: время последнего T и T95, удельный поток створа входа J, чел/(с·м); в скобках – отклонение Δ от экспериментального значения

опыт	проём b × l, м	N	эксперимент: T, с	T95, с	J	базовая (M0-3, предел 1,42): T, с (Δ, с; Δ %)	J (Δ)	ERD	В допуске ±20 %	откалиброванная (профиль по измеренным V_0 и кривой): T, с (Δ, с; Δ %)	J (Δ)	ERD	В допуске ±20 %
b090	0,90 × 4,00	170	106,7	99,8	1,75	140,6 (+33,9 с; +32 %)	1,34 (−23 %)	0,44	нет	99,3 (−7,4 с; −7 %)	1,90 (+9 %)	0,08	да
b100	1,00 × 4,00	178	97,1	89,5	1,86	133,1 (+36,0 с; +37 %)	1,33 (−28 %)	0,52	нет	95,4 (−1,7 с; −2 %)	1,85 (−1 %)	0,11	да
b110	1,10 × 4,00	179	90,0	83,5	1,81	122,6 (+32,6 с; +36 %)	1,31 (−27 %)	0,52	нет	89,2 (−0,8 с; −1 %)	1,83 (+1 %)	0,10	да
b120	1,20 × 4,00	178	77,0	71,5	1,91	110,8 (+33,8 с; +44 %)	1,34 (−30 %)	0,58	нет	82,9 (+5,9 с; +8 %)	1,79 (−6 %)	0,18	да
l0	1,20 × 0,06	178	65,7	61,5	2,24	114,3 (+48,6 с; +74 %)	1,29 (−43 %)	0,88	нет	76,0 (+10,3 с; +16 %)	1,95 (−13 %)	0,28	да
l2	1,20 × 2,00	178	78,4	73,7	1,89	108,1 (+29,7 с; +38 %)	1,36 (−28 %)	0,47	нет	82,4 (+4,0 с; +5 %)	1,81 (−4 %)	0,12	да
l4	1,20 × 4,00	178	80,3	74,3	1,88	110,8 (+30,5 с; +38 %)	1,34 (−29 %)	0,55	нет	82,9 (+2,6 с; +3 %)	1,79 (−5 %)	0,16	да
b140	1,40 × 4,00	176	65,0	60,7	1,95	92,1 (+27,1 с; +42 %)	1,35 (−31 %)	0,53	нет	70,3 (+5,3 с; +8 %)	1,80 (−8 %)	0,17	да
b160	1,60 × 4,00	178	62,6	57,6	1,82	82,5 (+19,9 с; +32 %)	1,35 (−26 %)	0,49	нет	62,6 (0,0 с; 0 %)	1,80 (−1 %)	0,14	да
b180	1,80 × 4,00	176	49,6	45,2	2,00	72,3 (+22,7 с; +46 %)	1,35 (−32 %)	0,63	нет	56,4 (+6,8 с; +14 %)	1,77 (−11 %)	0,26	да
b200	2,00 × 4,00	178	50,1	46,1	1,81	65,8 (+15,7 с; +31 %)	1,34 (−26 %)	0,52	нет	51,7 (+1,6 с; +3 %)	1,80 (0 %)	0,19	да

опыт	проём b × l, м	N	эксперимент: T, с	T95, с	J	базовая (M0-3, предел 1,42): T, с (Δ, с; Δ %)	J (Δ)	ERD	В допуске ±20 %	откалиброванная (профиль по измеренным V_0 и кривой): T, с (Δ, с; Δ %)	J (Δ)	ERD	В допуске ±20 %
b220	2,20 × 4,00	177	43,6	39,8	1,94	59,4 (+15,8 с; +36 %)	1,35 (−31 %)	0,56	нет	47,2 (+3,6 с; +8 %)	1,78 (−8 %)	0,22	да
b250	2,50 × 4,00	176	34,4	31,6	2,12	51,4 (+17,0 с; +49 %)	1,37 (−36 %)	0,66	нет	41,8 (+7,4 с; +21,5 %)	1,80 (−15 %)	0,32	нет

Таблица 76. Коридор Jülich 2009 по постановкам (имя – ширины входа, коридора и выхода в сантиметрах): время последнего через створ выхода T и T95, удельный поток выхода J; в скобках – отклонение Δ от экспериментального значения

опыт	вход / коридор / выход, м	N	эксперимент: T, с	T95, с	J	базовая (M0-3, предел 1,42): T, с (Δ, с; Δ %)	J (Δ)	ERD	В допуске ±20 %	откалиброванная (профиль по измеренным V_0 и кривой): T, с (Δ, с; Δ %)	J (Δ)	ERD	В допуске ±20 %
050-180-180	0,50 / 1,8 / 1,80	61	59,1	57,8	0,72	102,1 (+43,0 с; +73 %)	0,35 (−52 %)	0,65	нет	74,0 (+14,9 с; +25 %)	0,50 (−30 %)	0,24	нет
060-180-180	0,60 / 1,8 / 1,80	66	54,6	52,6	0,73	91,0 (+36,4 с; +67 %)	0,43 (−41 %)	0,60	нет	66,3 (+11,7 с; +21,4 %)	0,64 (−11 %)	0,21	нет
070-180-180	0,70 / 1,8 / 1,80	111	78,4	73,6	0,88	125,2 (+46,8 с; +60 %)	0,52 (−41 %)	0,62	нет	92,5 (+14,1 с; +18 %)	0,74 (−16 %)	0,24	да
100-180-180	1,00 / 1,8 / 1,79	121	57,0	54,8	1,34	99,7 (+42,7 с; +75 %)	0,73 (−45 %)	0,67	нет	74,7 (+17,7 с; +31 %)	1,05 (−22 %)	0,31	нет
145-180-180	1,44 / 1,8 / 1,80	175	73,3	69,8	1,51	99,4 (+26,1 с; +36 %)	1,06 (−30 %)	0,34	нет	77,4 (+4,1 с; +6 %)	1,47 (−3 %)	0,14	да
180-180-180	1,80 / 1,8 / 1,80	220	87,8	83,2	1,58	101,6 (+13,8 с; +16 %)	1,33 (−16 %)	0,16	да	90,1 (+2,3 с; +3 %)	1,58 (0 %)	0,08	да
180-180-120	1,80 / 1,8 / 1,20	170	79,6	75,3	1,95	110,4 (+30,8 с; +39 %)	1,37 (−30 %)	0,42	нет	84,3 (+4,7 с; +6 %)	1,95 (0 %)	0,15	да
180-180-095	1,80 / 1,8 / 0,95	159	97,0	92,2	1,84	130,4 (+33,4 с; +35 %)	1,35 (−27 %)	0,34	нет	97,0 (0,0 с; 0 %)	1,98 (+8 %)	0,05	да
180-180-070	1,80 / 1,8 / 0,70	148	97,6	91,5	2,32	168,3 (+70,7 с; +72 %)	1,30 (−44 %)	0,75	нет	122,0 (+24,4 с; +25 %)	1,86 (−20 %)	0,30	нет
065-240-240	0,65 / 2,4 / 2,40	70	53,8	52,0	0,63	89,4 (+35,6 с; +66 %)	0,35 (−44 %)	0,58	нет	65,3 (+11,5 с; +21,3 %)	0,51 (−18 %)	0,20	нет
080-240-240	0,80 / 2,4 / 2,40	118	69,0	66,2	0,80	116,7 (+47,7 с; +69 %)	0,44 (−44 %)	0,66	нет	85,4 (+16,4 с; +24 %)	0,64 (−19 %)	0,25	нет

опыт	вход / коридор / выход, м	N	эксперимент: T, с	T95, с	J	базовая (M0-3, предел 1,42): T, с (Δ, с; Δ %)	J (Δ)	ERD	В допуске ±20 %	откалиброванная (профиль по измеренным V_0 и кривой): T, с (Δ, с; Δ %)	J (Δ)	ERD	В допуске ±20 %
095-240-240	0,94 / 2,4 / 2,40	108	55,4	53,8	0,90	94,7 (+39,3 с; +71 %)	0,52 (−43 %)	0,62	нет	68,9 (+13,5 с; +24 %)	0,76 (−16 %)	0,23	нет
145-240-240	1,44 / 2,4 / 2,40	155	56,7	52,9	1,33	90,6 (+33,9 с; +60 %)	0,80 (−40 %)	0,56	нет	66,7 (+10,0 с; +18 %)	1,15 (−14 %)	0,25	да
190-240-240	1,90 / 2,4 / 2,40	218	69,6	65,7	1,50	92,4 (+22,8 с; +33 %)	1,08 (−28 %)	0,30	нет	75,3 (+5,7 с; +8 %)	1,42 (−5 %)	0,13	да
240-240-240	2,40 / 2,4 / 2,40	246	72,8	68,0	1,60	85,6 (+12,8 с; +18 %)	1,33 (−17 %)	0,22	да	79,7 (+6,9 с; +10 %)	1,52 (−5 %)	0,20	да
240-240-160	2,40 / 2,4 / 1,60	276	97,0	91,8	1,94	131,8 (+34,8 с; +36 %)	1,38 (−29 %)	0,39	нет	101,3 (+4,3 с; +4 %)	1,95 (0 %)	0,13	да
240-240-130	2,40 / 2,4 / 1,30	247	97,3	91,8	2,10	148,6 (+51,3 с; +53 %)	1,34 (−36 %)	0,54	нет	110,2 (+12,9 с; +13 %)	1,93 (−8 %)	0,18	да
240-240-100	2,40 / 2,4 / 1,00	254	121,5	115,4	2,20	199,2 (+77,7 с; +64 %)	1,32 (−40 %)	0,66	нет	140,2 (+18,7 с; +15 %)	1,96 (−11 %)	0,19	да
080-300-300	0,80 / 3,0 / 3,00	119	81,9	79,3	0,53	115,1 (+33,2 с; +41 %)	0,37 (−31 %)	0,45	нет	86,2 (+4,3 с; +5 %)	0,51 (−4 %)	0,14	да
100-300-300	1,00 / 3,0 / 3,00	100	51,4	49,1	0,74	83,6 (+32,2 с; +63 %)	0,44 (−40 %)	0,55	нет	63,8 (+12,4 с; +24 %)	0,63 (−15 %)	0,21	нет
120-300-300	1,20 / 3,0 / 3,00	163	65,6	61,7	0,93	113,2 (+47,6 с; +72 %)	0,51 (−46 %)	0,68	нет	75,3 (+9,7 с; +15 %)	0,84 (−10 %)	0,16	да
180-300-300	1,80 / 3,0 / 3,00	208	59,1	56,4	1,39	94,7 (+35,6 с; +60 %)	0,80 (−42 %)	0,54	нет	70,1 (+11,0 с; +19 %)	1,17 (−16 %)	0,22	да
240-300-300	2,40 / 3,0 / 3,00	296	67,7	63,6	1,65	98,9 (+31,2 с; +46 %)	1,09 (−34 %)	0,47	нет	81,9 (+14,2 с; +20,9 %)	1,41 (−14 %)	0,29	нет

опыт	вход / коридор / выход, м	N	эксперимент: T, с	T95, с	J	базовая (M0-3, предел 1,42): T, с (Δ, с; Δ %)	J (Δ)	ERD	В допуске ±20 %	откалиброванная (профиль по измеренным V_0 и кривой): T, с (Δ, с; Δ %)	J (Δ)	ERD	В допуске ±20 %
300-300-300	3,00 / 3,0 / 3,00	349	80,1	74,4	1,65	95,9 (+15,8 с; +19,7 %)	1,34 (−19 %)	0,28	да	90,2 (+10,1 с; +13 %)	1,52 (−8 %)	0,24	да
300-300-200	3,00 / 3,0 / 2,00	351	97,7	92,7	1,91	136,2 (+38,5 с; +39 %)	1,37 (−28 %)	0,39	нет	106,5 (+8,8 с; +9 %)	1,88 (−2 %)	0,13	да
300-300-160	3,00 / 3,0 / 1,60	288	95,0	89,6	1,99	139,0 (+44,0 с; +46 %)	1,37 (−32 %)	0,47	нет	106,2 (+11,2 с; +12 %)	1,90 (−5 %)	0,17	да
300-300-120	3,00 / 3,0 / 1,20	348	130,7	123,5	2,31	222,4 (+91,7 с; +70 %)	1,34 (−42 %)	0,73	нет	158,1 (+27,4 с; +21,0 %)	1,96 (−15 %)	0,25	нет
300-300-080	3,00 / 3,0 / 0,80	270	160,4	151,5	2,17	260,2 (+99,8 с; +62 %)	1,34 (−38 %)	0,63	нет	184,8 (+24,4 с; +15 %)	1,91 (−12 %)	0,18	да

Отклонение базовой конфигурации вызвано пределом потока проёма 1,42 чел/(с·м). Измеренные ёмкости проёмов, 1,75…2,53 чел/(с·м), лежат между этим пределом и наибольшей интенсивностью табл. П2.8 методики. При ширине 0,9…2,5 м предел на 20…45 % ниже измеренной ёмкости. Там, где проход через проём определяет расчётное время эвакуации, оно больше экспериментального. Фактический поток створа в расчёте составляет 0,91…0,96 от предела в казарме и 0,25…0,98 в коридоре. Меньшие доли дают постановки, где вход сужен и предел не достигается. Значение 1,42 чел/(с·м) – интенсивность движения через дверной проём при максимальной плотности q_{Dmax}. Происхождение этого числа разобрано в разделе 2.6. До такого уплотнения очередь в лабораторном опыте не доходит, но в расчётной модели скопление перед створом образуется, поэтому предел действует и ограничивает поток.

В откалиброванной конфигурации расчётное время эвакуации по коридору больше экспериментального во всех 28 постановках: в десяти с входом 0,5…1,2 м в среднем на +20,9 %, в остальных восемнадцати – на +12,0 %. Расчётный удельный поток через вход шириной 0,50…0,80 м составляет 1,86…1,95 при измеренных 2,04…2,43 чел/(с·м): при снятом ограничении поток в узком створе задаёт механика движения агентов, и она пропускает через такой проём меньше людей, чем проходило в опыте. В казарме тот же расчёт даёт поток створа 1,77…1,95 при измеренных 1,75…2,24 чел/(с·м), то есть попадает в измеренный диапазон, и расчётное время эвакуации больше экспериментального в девяти опытах из 13.

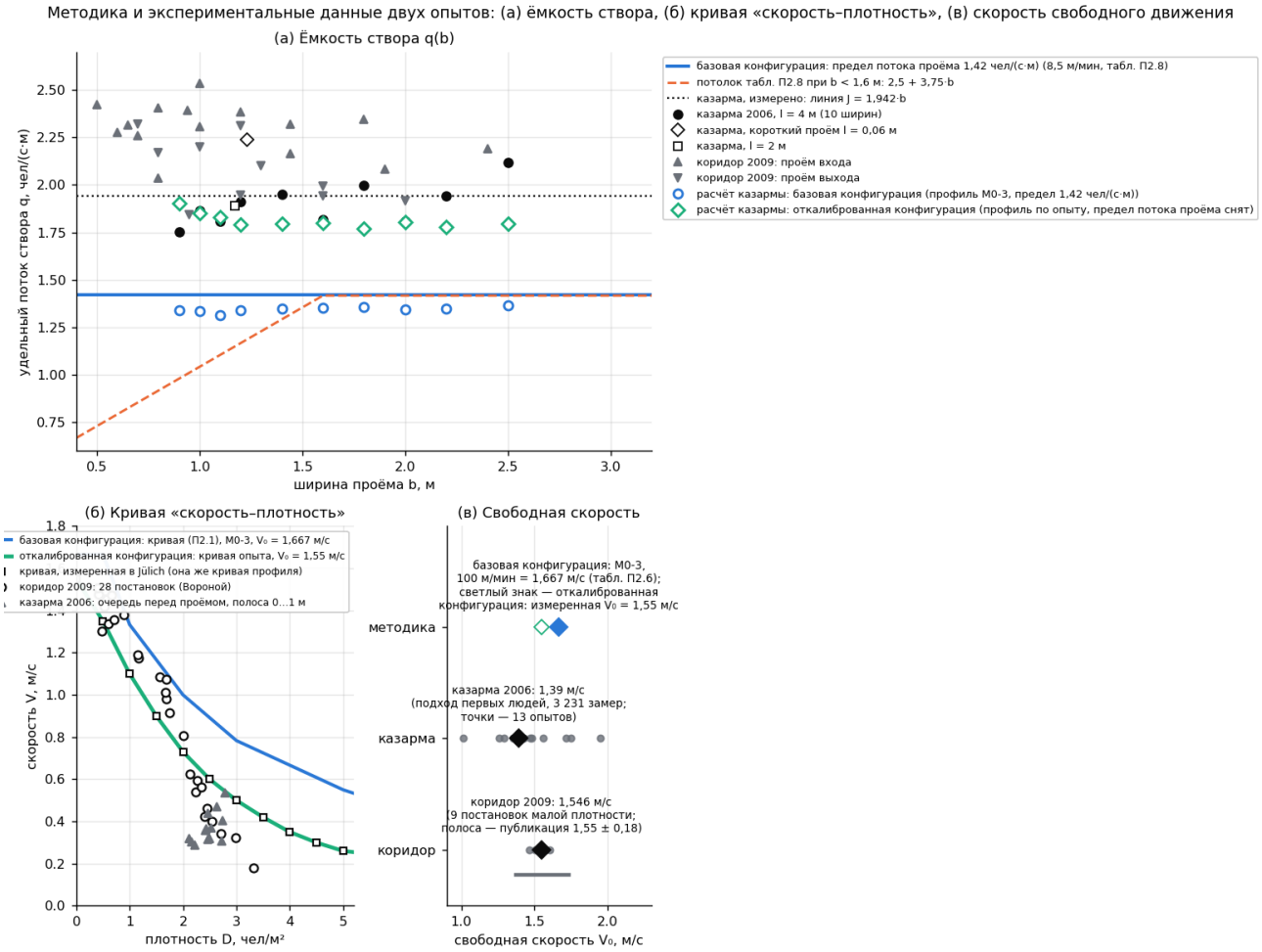


Рисунок 133. Методика и экспериментальные данные двух опытов: (а) ёмкость створа в зависимости от ширины проёма, (б) кривая «скорость–плотность». Панель (в) показывает скорость свободного движения; во всех трёх панелях приведены табличные и измеренные значения

В трёх постановках коридора без сужений кривая «скорость–плотность» откалиброванной конфигурации и есть измеренная в этом опыте, но расчётные точки на неё не попадают: они расположены при большей плотности и меньшей скорости, чем экспериментальные, – 0,61…0,65 м/с при 2,54…2,73 чел/м² против измеренных 0,81…1,07 м/с при 1,67…2,01 чел/м². Плотность в области измерения вычислена по расчёту той же обработкой, что и по опыту, но мера локальной плотности, по которой модель выбирает скорость на кривой, от неё отличается, поэтому совпадение кривой профиля с измеренной не даёт совпадения точек. Пересчёт кривой в меру локальной плотности модели согласия не улучшает: в допуск входят 6 точек из 41. При действующем пределе 1,42 чел/(с·м) расчётная плотность ниже экспериментальной, а скорость выше.

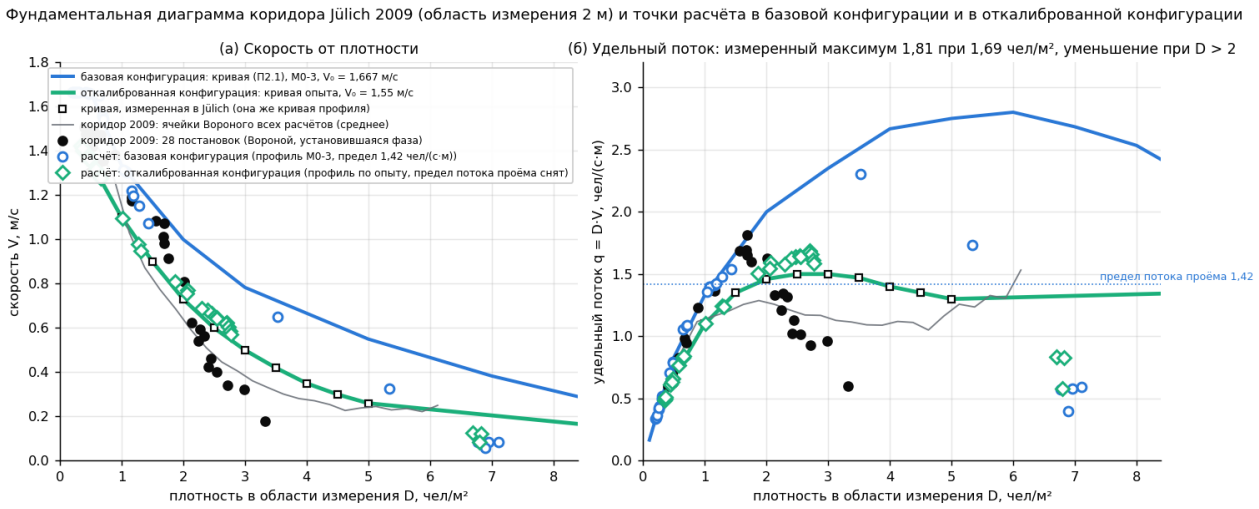


Рисунок 134. Коридор Jülich 2009, область измерения 2 м: (а) скорость и (б) удельный поток в зависимости от плотности; 28 экспериментальных постановок, кривая (П2.1) профиля M0-3 и табулированная кривая откалиброванной конфигурации, совпадающая с измеренной, базовая конфигурация (предел 1,42 чел/(с·м)) и откалиброванная (без ограничения потока проёма)

Два свойства модели, которые следует учитывать при переносе этих результатов на другие задачи. Первое: результат расчёта без ограничения потока проёма зависит от персональной дистанции профиля, а такой величины в таблицах методики нет (приложение Е). Второе: результат задаёт кривая «скорость–плотность» целиком, а не уровень скорости свободного движения, поэтому профиль библиотеки нельзя подобрать по одной скорости – вместе с ней меняются коэффициент a, порог D_0 и площадь проекции.

ЧТО НЕ ВОСПРОИЗВОДИТСЯ

Ни одна из двух конфигураций не воспроизводит строение очереди перед створом. В лабораторном опыте это область плотностью 2,1…3,3 чел/м² со скоростью 0,3…0,5 м/с, в расчёте – скопление при скорости 0,07…0,20 м/с и плотности до 7,3 чел/м². Проекции агентов в ней сближаются до касания, тогда как участники опытов сохраняли дистанцию.

Различие условий при этом заложено в назначении расчёта. Расчёт ведётся для эвакуации при пожаре, когда стоящие сзади напирают на впереди идущих, и плотность очереди перед створом доходит до верхней части шкалы методики: кривая «скорость–плотность» профиля задана до 9 чел/м², то есть до 0,9 м²/м² при f = 0,1 м². Оба опыта Jülich поставлены без напора: участникам предписано идти целенаправленно, но без спешки, особо оговорено не толкаться, и авторы прямо исключают влияние паники и давления [27;29;30]. Плотная очередь расчёта – поэтому не ошибка воспроизведения спокойного движения, а условие эвакуации при пожаре. При действующем пределе потока проёма расчётное время эвакуации остаётся оценкой сверху по отношению к опыту: +41,2 % по казарме и +52,1 % по коридору по времени прохода последнего. Два кадра ниже показывают это различие прямо.

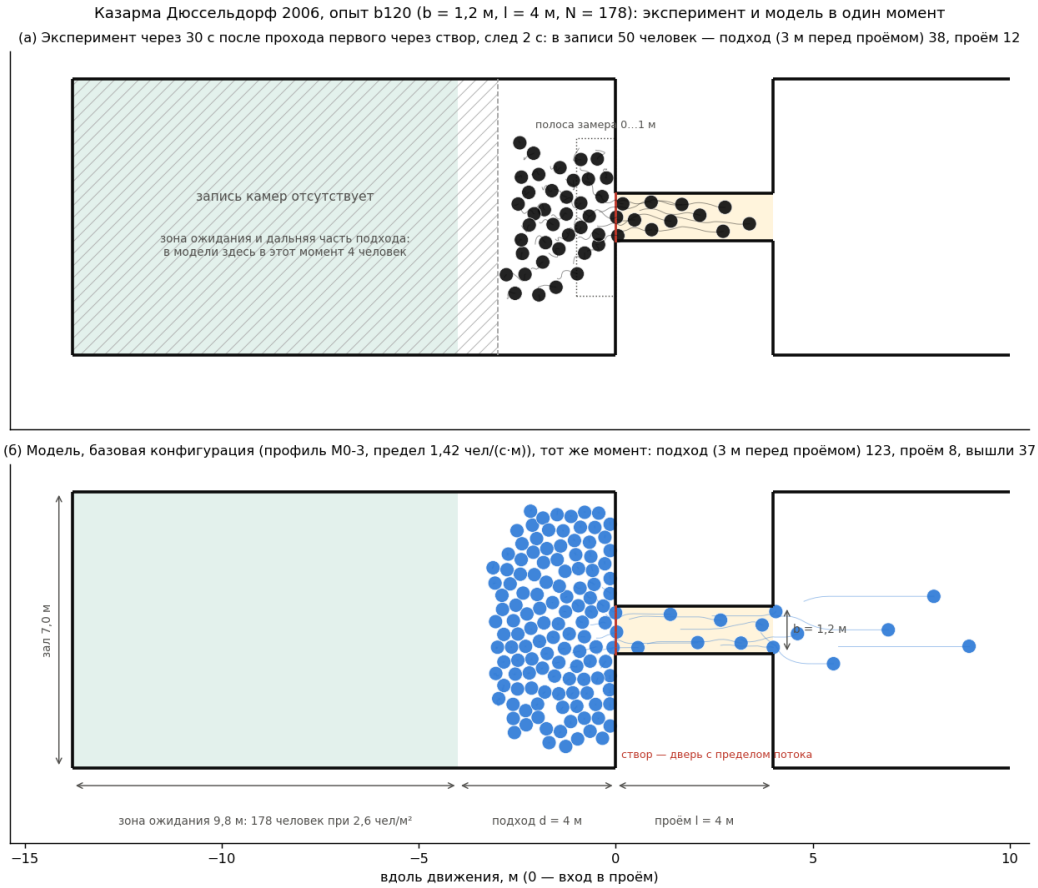


Рисунок 135. Строение очереди перед створом, казарма Дюссельдорф 2006, опыт b120 (b = 1,2 м, l = 4 м, N = 178), один и тот же момент – через 30 с после прохода первого через створ: (а) участники по трекам голов, (б) агенты базовой конфигурации (профиль M0-3, предел 1,42 чел/(с·м)). В записи камер 50 человек: 38 на подходе (3 м перед проёмом) и 12 в проёме, между ними видны промежутки. В расчёте в тот же момент 123 человека на подходе, 8 в проёме, 37 уже вышли, 4 остаются в зоне ожидания и дальней части подхода, а проекции агентов сомкнуты до касания. Плотность в полосе 0…1 м перед проёмом равна 2,7 чел/м² в опыте и 7,1 чел/м² в расчёте, скорость там же – 0,31 и 0,09 м/с. Люди показаны кругами Ø 0,357 м со следом 2 с; штриховкой отмечена область, которую камеры не снимали, в заголовках панелей – число людей по участкам

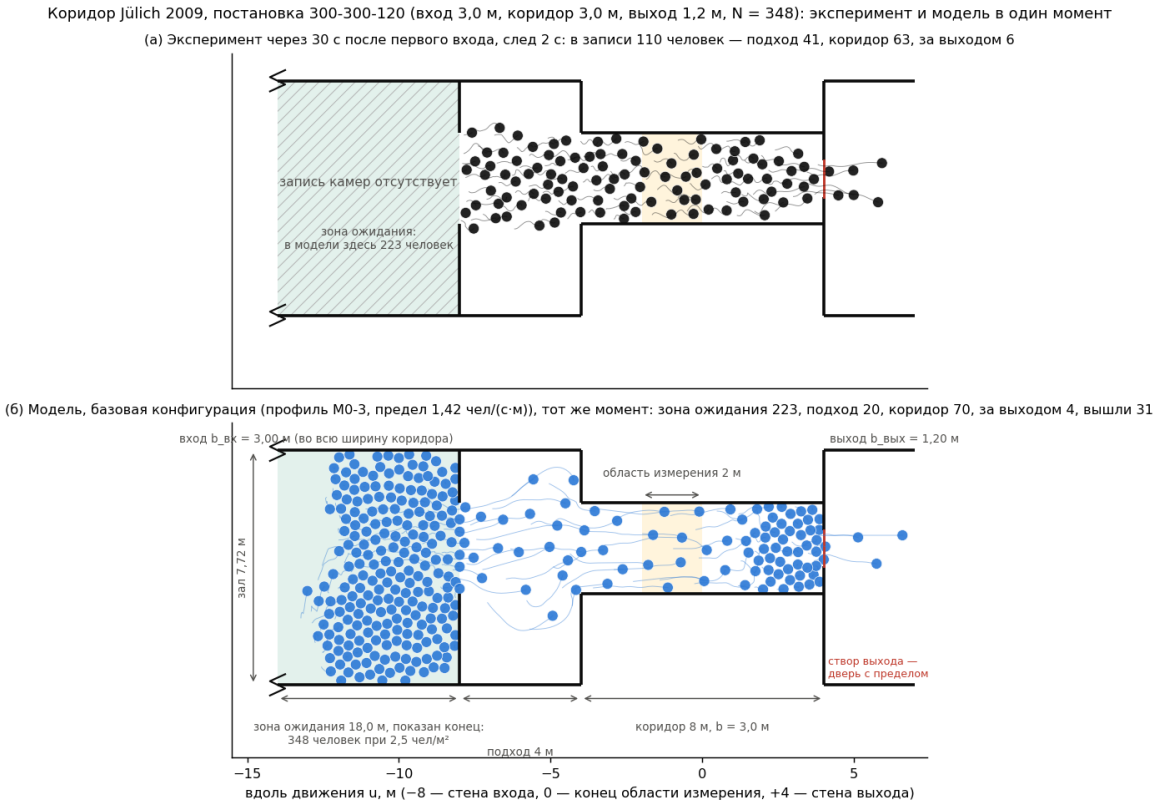


Рисунок 136. Строение очереди в коридоре Jülich 2009, постановка 300-300-120 (вход 3,0 м, коридор 3,0 м, выход 1,2 м, N = 348), один и тот же момент – через 30 с после первого входа: (а) участники по трекам голов, (б) агенты базовой конфигурации (профиль M0-3, предел 1,42 чел/(с·м)). В записи камер 110 человек: 41 на подходе, 63 в коридоре, 6 за выходом, и в коридоре между ними сохраняется дистанция. В расчёте в тот же момент 20 человек на подходе, 70 в коридоре, 4 за выходом, 31 вышел, 223 остаются в зоне ожидания; перед суженным выходом проекции агентов сомкнуты. Плотность в области измерения равна 2,7 чел/м² в опыте и 5,6 чел/м² в расчёте, скорость там же – 0,34 и 0,08 м/с. Люди показаны кругами Ø 0,357 м со следом 2 с; штриховкой отмечена зона ожидания, которую камеры не снимали, в заголовках панелей – число людей по участкам

Три следствия различия сохраняются и при снятом ограничении потока проёма:

- **спад потока по ходу опыта**: на рисунке числа вышедших от времени измеренная зависимость

выпуклая, а расчётная близка к прямой, поэтому в первой половине отклонение больше, чем к концу.

- **зависимость ёмкости створа от его ширины и длины**: измеренная ёмкость коротких проёмов в стене,

2,04…2,53 чел/(с·м), выше ёмкости длинных проёмов, 1,75…2,12 чел/(с·м), а расчёт без ограничения потока проёма такого различия не даёт. На входах коридора шириной 0,5…0,7 м расчётный удельный поток составляет 1,86…1,95 при измеренных 2,26…2,43 чел/(с·м), а в длинных проёмах казармы – 1,77…1,95 при измеренных 1,75…2,24 чел/(с·м).

- **высокоплотная ветвь кривой «скорость–плотность»** коридора при D > 2 чел/м², где поток убывает

до 0,6 чел/(с·м), точками расчёта не покрывается. На этой ветви расчётные точки стоят при 3,5…7,1 чел/м² в базовой конфигурации и при 2,1…6,8 чел/м² в откалиброванной.

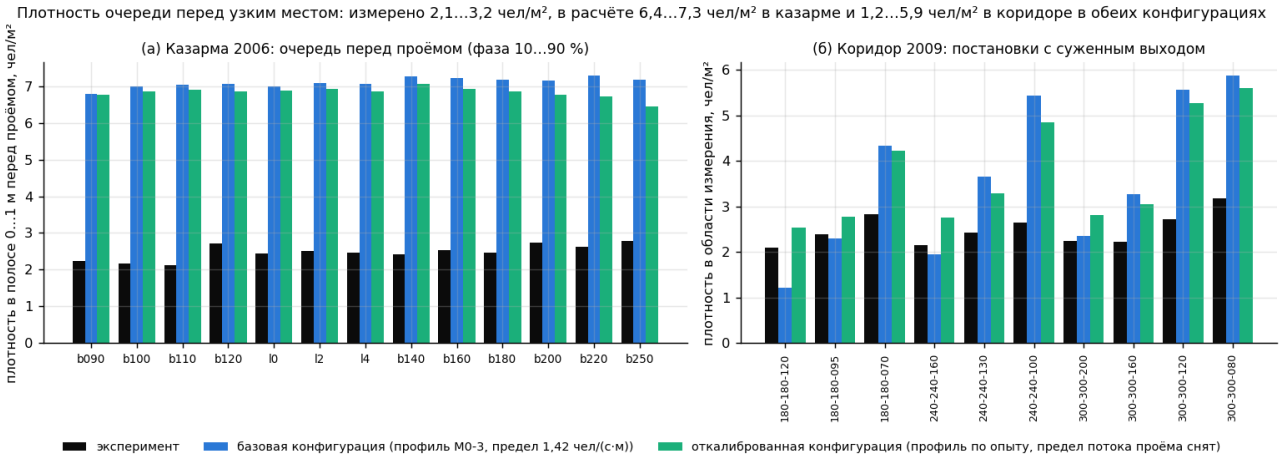


Рисунок 137. Плотность очереди перед створом: (а) казарма, полоса 0…1 м перед проёмом; (б) коридор, область измерения при суженном выходе; экспериментальные данные, базовая конфигурация (профиль M0-3, предел 1,42 чел/(с·м)) и откалиброванная (профиль по измеренным V_0 и кривой, без ограничения потока проёма)

Г6.4 Выводы

В базовой конфигурации, с профилем M0-3 и нормативным пределом потока проёма, расчётное время эвакуации больше экспериментального во всех постановках казармы и коридора: расчёт по методике даёт оценку сверху, а в допуск входят единичные точки. Причина в том, что предел табл. П2.8 методики ниже ёмкости створов, измеренной в этих же опытах.

В откалиброванной конфигурации изменены два параметра. Профиль составлен из измеренных в опыте скорости свободного движения и кривой «скорость–плотность» коридора 2009 при табличной площади проекции; ограничение потока проёма снято, поскольку измеренная ёмкость створов выше нормативного предела. В допуск входит большая часть точек обеих серий, критерий ISO 20414 выполнен в обеих. Кривая снята в коридоре 2009, а казарма 2006 – другой опыт, и её точки получены переносом профиля без изменений: это независимая проверка. Расчётное время эвакуации остаётся больше экспериментального в большинстве точек, то есть оценка сверху по среднему сохраняется. Расчётом пожарного риска такой расчёт не служит: требование табл. П2.8 в нём не применяется ни в одном створе, а параметры профиля взяты из опыта, а не из табл. П2.6 методики.

Ограничение применения в рассмотренных постановках: выводы относятся к проёмам и коридорам испытанных ширин и к здоровым взрослым, идущим без спешки. Строение очереди перед проёмом не воспроизводится ни в одной из двух конфигураций: в расчёте проекции агентов сомкнуты, тогда как участники опытов сохраняли дистанцию. Различие отвечает назначению расчёта – эвакуации при пожаре, когда стоящие сзади напирают на впереди идущих. Результат без ограничения потока проёма зависит от персональной дистанции профиля, а такой величины в таблицах методики нет.

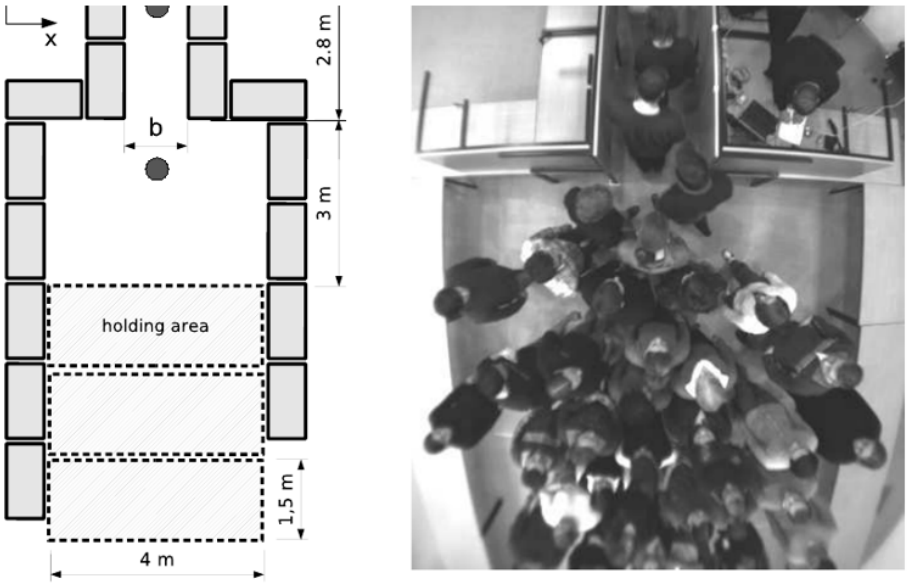
Приложение Г7. Лабораторные ряды по ширине проёма: Seyfried 2005 и Kretz 2006

Г7.1 Источник и данные

Приложение содержит валидацию по двум лабораторным рядам, измеряющим одну величину: **как удельный поток через проём зависит от его ширины**. Эта зависимость определяет, сколько людей проходит через дверь в единицу времени, и потому прямо влияет на расчётное время эвакуации из помещения. Методика задаёт её одним предельным значением интенсивности [1, табл. П2.8], а ряды позволяют сравнить это значение с измеренным на девяти ширинах проёма. Допуск валидации ±20 % по каждой точке (раздел 1.4). Для сведения по каждому ряду приводятся меры ERD ⩽ 0,45 и EPC 0,6…1,4 [43] (раздел 1.5). Ниже собственного разброса опытов (±9 % у Зайфрида) расхождение не обсуждается.

Ряд Зайфрида – опыт 7 декабря 2005 г. в ротонде Forschungszentrum Jülich [27], съёмка двумя камерами 25 кадр/с: зал шириной 4,0 м с размеченными зонами ожидания, узкое место длиной 2,8 м, ширина b = 0,8…1,2 м с шагом 0,1 м, 20 / 40 / 60 участников. Поставлено 18 опытов. Опубликованы траектории [35] и удельный поток по каждому из 15 [27, табл. 2]. Ряд Кретца – опыт 2006 г. в Университете Дуйсбург-Эссен [34], шаг кадра 0,0334 с: зал около 4,0 × 9,0 м, проём между двумя шкафами глубиной 0,4 м, b = 0,4…1,6 м, 94 участника стоят вплотную к проёму. Поток опубликован графиком, числовая таблица содержит средний интервал между проходящими [34, табл. 3]. Контингент обоих рядов одинаков по типу (взрослые здоровые студенты и сотрудники института), участникам предписано идти целенаправленно, но без спешки, поэтому ряды рассмотрены совместно. Третьим набором данных взята обобщённая линия серии [32]. Ширина проёма всюду обозначена **b**. Сравнивается 30 точек: 15 опытов Зайфрида, семь ширин Кретца и восемь значений обобщённой линии.

Две установки одной задачи: поток через проём переменной ширины



а) Seyfried и др.: зал 4 м, размеченные зоны ожидания, узкое место длиной 2,8 м шириной 0,8…1,2 м; справа — фото перед входом (по Seyfried и др., 2009, рис. 2)



б) Kretz и др.: проём между двумя шкафами глубиной 0,4 м, ширина 0,4…1,6 м, зал 4 × 9 м, 94 участника стоят вплотную к проёму (по Kretz и др., 2006, рис. 1)

Оба ряда — лаборатория, студенты и сотрудники, движение «без спешки, но целенаправленно»; измеряется одна и та же величина — удельный поток через створ, чел/(с·м).

Рисунок 138. Две установки одной задачи: (а) узкое место 2,8 × 0,8…1,2 м в зале шириной 4 м (по [27], рис. 2); (б) проём между шкафами (по [34], рис. 1)

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ЗНАЧЕНИЯ РЯДА ЗАЙФРИДА

Удельный поток $J = \Delta N/(\Delta t \cdot b)$, где Δt – время между первым и последним прошедшим. Створ проходит по середине узкого места, $y = 0{,}4$ м.

Таблица 77. Удельный поток ряда Зайфрида по 15 опытам, чел/(с·м)

b, м	N = 20	N = 40	N = 60
0,8	1,86	1,77	1,61
0,9	2,06	1,91	1,86
1,0	2,19	2,08	1,90
1,1	1,78	1,93	1,93
1,2	2,31	1,81	1,97

Среднее по 15 опытам – **1,93 чел/(с·м)** при разбросе 1,61…2,31. Среднеквадратическое отклонение 0,17 составляет **±9 % при одинаковых условиях опыта**. Значения, посчитанные по опубликованным траекториям [35] тем же определением, совпали с опубликованными во всех 15 опытах: расхождение ⩽ 0,01 чел/(с·м).

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ЗНАЧЕНИЯ РЯДА КРЕТЦА

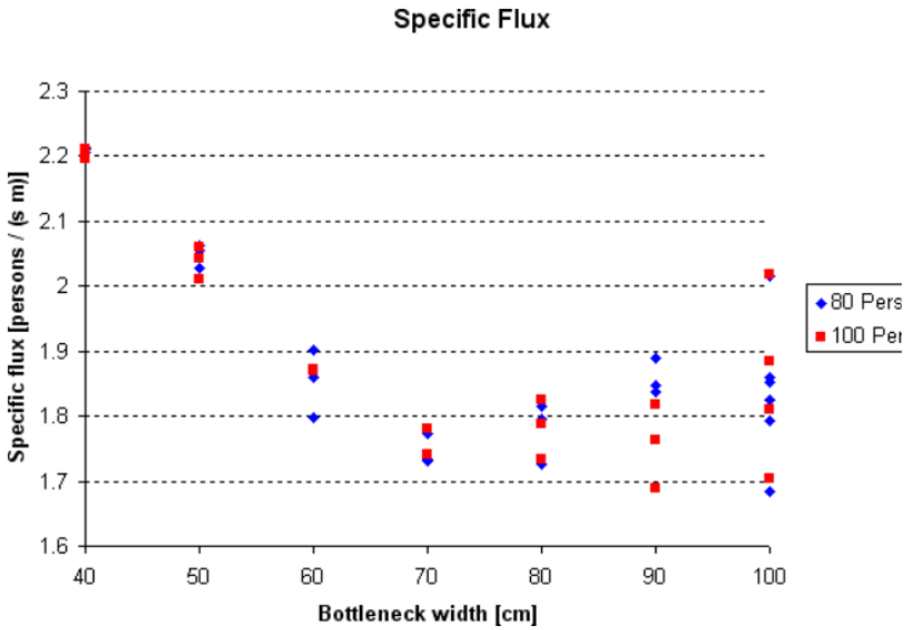
Из числовой таблицы источника [34, табл. 3] (средний интервал $\Delta\bar{t}$ между проходящими): $Q = 1/\Delta\bar{t}$, $J = Q/b$.

Таблица 78. Экспериментальные значения ряда Кретца, восстановленные из интервалов между проходящими

b, м	$\Delta\bar{t}$, с	Ско, с	$Q = 1/\Delta\bar{t}$, чел/с	J, чел/(с·м)
0,4	1,14	0,21	0,88	**2,19**
0,5	0,98	0,18	1,02	**2,04**
0,6	0,87	0,18	1,15	**1,92**
0,7	0,82	0,25	1,22	**1,74**
0,8	0,70	0,27	1,43	**1,79**
1,0	0,56	0,30	1,79	**1,79**
1,2	*0,47*	*0,26*	*2,13*	*1,77*

Восстановление сверено с текстом статьи [34, § 4]: расхождение ⩽ 5 % (1,79 против 1,85…1,89 чел/с при b = 1,0 м). При b ⩾ 1,2 м узкое место перестало ограничивать поток: участники не успевали уходить из зоны за проёмом. Точка b = 1,2 м поэтому помечена курсивом и в выводы по ряду не включена. Рабочий диапазон b = 0,4…1,0 м, среднее по нему **1,91 чел/(с·м)**. При сужении проёма удельный поток увеличивается на 22 %, с 1,79 до 2,19 чел/(с·м) между b = 1,0 и 0,4 м, поскольку в узком проёме участники разворачивают корпус боком.

Главное наблюдение ряда Кретца: чем уже проём, тем выше удельный поток



Удельный поток по ширинам 0,4…1,0 м, счёт по первым 80 и 100 прошедшим (по Kretz и др., 2006, рис. 10)

У Зайфрида числа опубликованы таблицей (табл. 2, 15 опытов); у Кретца — только графиком, числовая таблица первоисточника даёт средний интервал между проходящими (табл. 3).

Рисунок 139. Опубликованный удельный поток ряда Кретца по ширинам 0,4…1,0 м, счёт по первым 80 и 100 прошедшим (по [34], рис. 10)

ОБОБЩЁННАЯ ЛИНИЯ СЕРИИ

Обзор [32, § 1] обобщает серию опытов Jülich и Вуппераля: удельный поток линейно зависит от ширины узкого места с наклоном около **1,9 чел/(с·м)** в диапазоне **0,7…5,0 м** при разбросе между опытами около ±15 %. Линия обобщает серию и отдельным опытом не служит. Она включена в сопоставление, поскольку предел потока проёма действует на всех ширинах, а измеренные опыты ограничены шириной b = 1,2 м. К тому же ряду принадлежит казарма Дюссельдорф 2006 (приложение Г6).

ЧТО ИСТОЧНИКОМ НЕ ЗАДАНО И ЧЕМ ВОСПОЛНЕНО

Таблица 79. Что содержат данные обоих рядов и чего в них нет

Что нужно для расчёта	Ряд Зайфрида [27]	Ряд Кретца [34]
План, размеры	**глубина зала не указана** – принята 8,0 м	ширина проёма выставлена дальномером с точностью 2 мм
Габарит, площадь проекции	**не измерялись**	**не измерялись** (дан только рост: пик около 170 и 180 см)
Скорость свободного движения	**прямо не публиковалась**; восстанавливается из таблицы источника как $V(0) = V_{stat} + A_v \rightarrow 1{,}53…1{,}83$, в среднем 1,71 м/с	**не публиковалась**
Начальная расстановка	3,3 чел/м², центр ближней зоны в 3,0 м; **форма и глубина зон не даны**	словесно («вплотную»); **числовой плотности нет** – в модели 2,6 чел/м² как следствие размеров зала и N
Повторы и разброс	по одному опыту на пару (b, N); разброс между опытами ±9 %	число опытов на ширину неизвестно; ско интервала 0,18…0,30 с
Траектории, видео	**опубликованы** [35], лицензия CC BY 4.0; таблица потоков воспроизведена по ним	**не опубликованы** – опыт выполнен вне архива Forschungszentrum Jülich
Оценка полноты	**данные достаточны с допущениями** (глубина зала, форма зон, габарит)	**данные достаточны с допущениями; полнота ниже**: поток восстановлен из таблицы интервалов, скорости нет, повторов нет, траекторий нет

Влияние допущений проверено на ряде Зайфрида: измеренная скорость 1,71 м/с вместо табличной 1,67 изменяет результат базовой конфигурации на 0,2 %, а при b = 1,0 м и N = 60 со скоростями 1,24…1,67 м/с разброс расчётного потока составил 2 %. Время в узком месте определяется **ёмкостью створа, а не скоростью подхода**, поэтому неизвестные скорости участников у Кретца на вывод не влияют. Для обобщённой линии оценка полноты другая: данных недостаточно для валидации как отдельного опыта. Этот ряд проверяет только наклон J(b).

Г7.2 Расчётная модель и конфигурации расчёта

Все три постановки собраны одинаково: прямоугольный зал → проём заданной ширины → выход. Расстановка равномерно случайная, время начала эвакуации ноль. Каждая из 30 точек посчитана в трёх расстановках в каждой из двух конфигураций расчёта. В таблицах приведены среднее по трём расстановкам и размах в скобках.

Таблица 80. Модели трёх рядов

	Ряд Зайфрида	Ряд Кретца	Обобщённая линия
Зал	4,0 × 8,0 м (глубина в источнике не указана – принята 8,0 м)	4,0 × 9,0 м (дословно по источнику)	ширина max(3b; 7) м
Длина проёма	2,8 м	0,4 м	1,0 м
Расстановка	полоса с плотностью расстановки 3,3 чел/м², центр в 3,0 м от входа	по всему залу; 94/(4·9) = 2,6 чел/м²	по всему залу, 3,0 чел/м²
Человек в модели	20 / 40 / 60	94	120·b (84…600)
Мера потока	$J = N/(t_{последний} - t_{первый})/b$ по двери «Проём»	то же (отличие от $1/\Delta\bar{t}$ равно $1/N \approx 1$ %)	то же
Расстановок на точку	3	3	3

Конфигурации расчёта различаются одним значением: пределом потока проёма. В базовой конфигурации профиль М0-3, летняя одежда, взят из библиотеки методики [1] целиком, предел потока

проёма равен 1,42 чел/(с·м) [1, табл. П2.8]. В откалиброванной конфигурации тот же профиль остаётся без изменений, а предел потока проёма задан равным 1,90 чел/(с·м) – это ёмкость створа, измеренная группой Forschungszentrum Jülich в опыте «казарма Дюссельдорф 2006». По траекториям 13 опытов длинное сужение пропускает поток по линии J = 1,942·b (приложение Г6). Сами ряды Зайфрида и Кретца в измерение этого значения не входят. Они служат независимой проверкой, и их собственный уровень 1,91…1,93 чел/(с·м) с этим значением совпадает.

Таблица 81. Конфигурации расчёта

Параметр	Базовая конфигурация	Откалиброванная конфигурация	Источник значения
Профиль	M0-3 (летняя одежда)	M0-3 (летняя одежда), параметры не изменялись	параметры – [1, табл. П2.6]; профиль назначен по контингенту и классу функциональной пожарной опасности [1, табл. П2.3]
Скорость свободного движения	V_0 = 1,67 м/с (100 м/мин), горизонтальный путь	то же, 1,67 м/с	не изменялась: [1, табл. П2.6]
Кривая «скорость–плотность»	(П2.1) с параметрами a = 0,295, D_0 = 0,51 чел/м²	та же кривая (П2.1)	не изменялась: [1, табл. П2.6]
Площадь проекции f	0,1 м²	то же, 0,1 м²	не изменялась: [1, табл. П2.6]
Персональная дистанция	10 чел/м² (значение по умолчанию)	то же	не изменялась; приложение Е
Предел потока проёма	**1,42 чел/(с·м)**	**1,90 чел/(с·м)**	базовая – [1, табл. П2.8], происхождение числа – раздел 2.6; откалиброванная – ёмкость створа, измеренная группой Forschungszentrum Jülich в казарме Дюссельдорф 2006 по траекториям 13 опытов (J = 1,942·b, приложение Г6) и в её же опытах по типам узлов [31, рис. 10]

Значение 1,90 чел/(с·м) подтверждается тремя независимыми измерениями: ёмкость узла «длинное сужение» [31], наклон J = 1,942·b по траекториям 13 опытов казармы Дюссельдорф 2006 из приложения Г6 и обобщённая линия J = 1,9·b [32]. Профиль в откалиброванной конфигурации остаётся библиотечным: его скорость свободного движения, кривая и площадь проекции табличные.

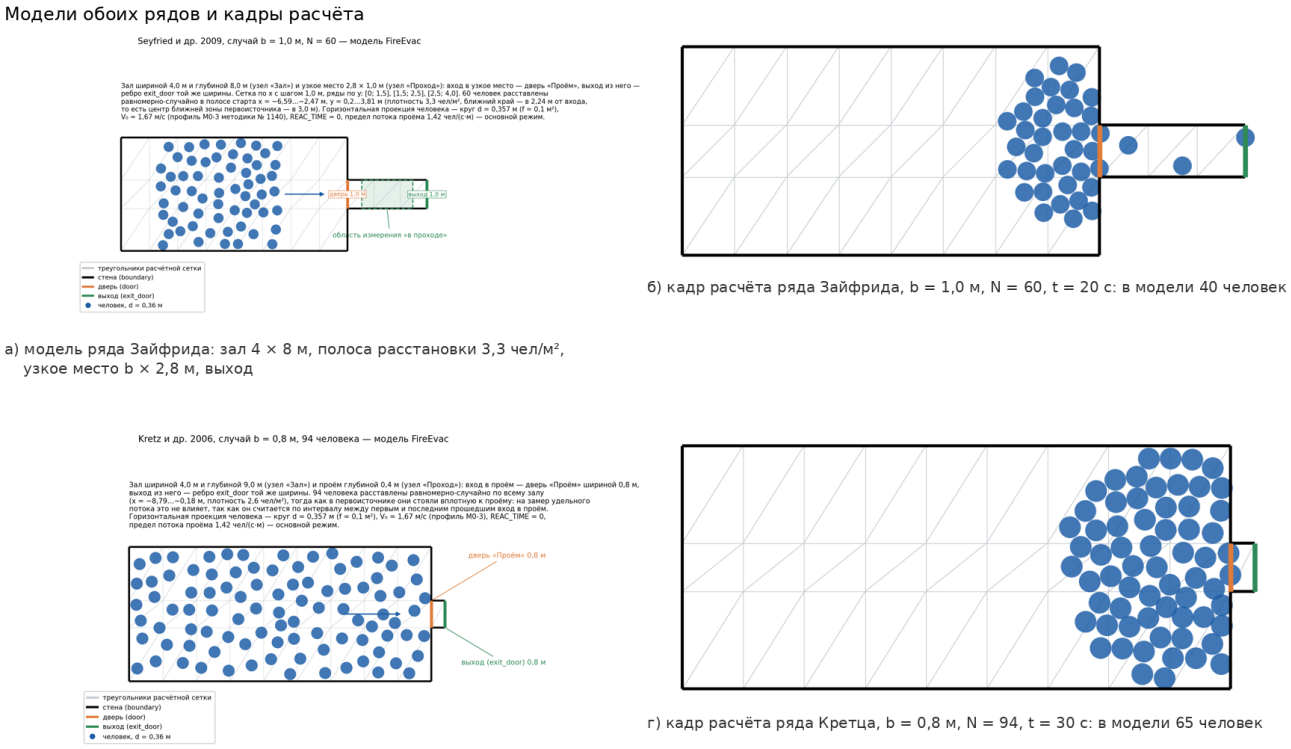


Рисунок 140. Модели обоих рядов и кадры расчёта: слева план зала с проёмом, справа кадр в установившейся фазе, где видны очередь и створ замера

Г7.3 Результаты и анализ

Отклонение Δ = 100·(расчётное значение − экспериментальное)/экспериментальное считается по удельному потоку. Знак по потоку обратен знаку по времени: расчётный поток меньше измеренного означает, что расчётное время прохода проёма больше экспериментального (раздел 1.4).

РЯД ЗАЙФРИДА, 15 ОПЫТОВ

Таблица 82. Ряд Зайфрида: экспериментальные значения и две конфигурации расчёта, удельный поток чел/(с·м)

b, м	N	Эксперимент	Базовая (M0-3, предел 1,42), мин…макс	Δ	В допуске ±20 %	Время выхода, с	Откалиброванная (предел 1,90 чел/(с·м)), мин…макс	Δ	В допуске ±20 %	Время выхода, с
0,8	20	1,86	1,43 (1,29…1,50)	−23,2 %	нет	22,4	1,65 (1,45…1,88)	−11,1 %	да	20,1
0,8	40	1,77	1,36 (1,31…1,39)	−23,0 %	нет	41,5	1,74 (1,52…1,85)	−1,8 %	да	33,7
0,8	60	1,61	1,38 (1,36…1,40)	−14,3 %	да	59,4	1,72 (1,71…1,73)	+6,6 %	да	48,5
0,9	20	2,06	1,49 (1,47…1,50)	−27,7 %	нет	19,7	1,84 (1,78…1,94)	−10,8 %	да	16,8
0,9	40	1,91	1,41 (1,38…1,46)	−26,3 %	нет	36,2	1,74 (1,67…1,79)	−8,9 %	да	30,2
0,9	60	1,86	1,36 (1,26…1,42)	−27,1 %	нет	54,0	1,65 (1,52…1,77)	−11,2 %	да	45,0
1,0	20	2,19	1,41 (1,32…1,47)	−35,8 %	нет	18,9	1,81 (1,68…1,91)	−17,2 %	да	15,8
1,0	40	2,08	1,37 (1,32…1,41)	−34,3 %	нет	33,7	1,62 (1,57…1,68)	−22,0 %	нет	29,4
1,0	60	1,90	1,32 (1,31…1,34)	−30,5 %	нет	50,1	1,76 (1,72…1,83)	−7,4 %	да	39,0
1,1	20	1,78	1,47 (1,41…1,50)	−17,6 %	да	17,2	1,69 (1,43…1,95)	−5,2 %	да	15,7
1,1	40	1,93	1,42 (1,38…1,45)	−26,5 %	нет	30,3	1,71 (1,61…1,80)	−11,3 %	да	26,0
1,1	60	1,93	1,40 (1,35…1,45)	−27,5 %	нет	43,9	1,73 (1,70…1,75)	−10,3 %	да	36,1
1,2	20	2,31	1,46 (1,41…1,49)	−36,6 %	нет	16,3	1,83 (1,74…1,88)	−20,6 %	нет	13,9
1,2	40	1,81	1,41 (1,35…1,45)	−22,3 %	нет	28,5	1,82 (1,78…1,88)	+0,4 %	да	23,2
1,2	60	1,97	1,37 (1,35…1,39)	−30,5 %	нет	41,1	1,76 (1,74…1,77)	−10,9 %	да	33,3

РЯД КРЕТЦА, СЕМЬ ШИРИН

Таблица 83. Ряд Кретца: экспериментальные значения и две конфигурации расчёта, удельный поток чел/(с·м)

b, м	Эксперимент	Базовая (M0-3, предел 1,42), мин…макс	Δ	В допуске ±20 %	Время выхода, с	Откалиброванная (предел 1,90 чел/(с·м)), мин…макс	Δ	В допуске ±20 %	Время выхода, с
0,4	2,19	1,22 (1,18…1,25)	−44,5 %	нет	197,1	1,50 (1,48…1,52)	−31,6 %	нет	158,8
0,5	2,04	1,33 (1,30…1,34)	−35,0 %	нет	144,0	1,63 (1,60…1,70)	−20,0 %	да	116,9
0,6	1,92	1,23 (1,22…1,25)	−35,6 %	нет	128,9	1,61 (1,58…1,63)	−16,2 %	да	99,0
0,7	1,74	1,26 (1,23…1,30)	−27,6 %	нет	108,3	1,65 (1,53…1,76)	−5,4 %	да	83,5
0,8	1,79	1,32 (1,24…1,36)	−26,3 %	нет	90,7	1,67 (1,59…1,73)	−6,4 %	да	72,0
1,0	1,79	1,26 (1,21…1,33)	−29,5 %	нет	76,3	1,61 (1,60…1,63)	−9,9 %	да	59,6
1,2 (скопление за проёмом)	*1,77*	*1,34 (1,27…1,41)*	*−24,6 %*	*нет*	*59,9*	*1,76 (1,70…1,80)*	*−1,0 %*	*да*	*46,0*

ШИРОКИЕ ПРОЁМЫ: ОБОБЩЁННАЯ ЛИНИЯ

Таблица 84. Обобщённая линия серии: экспериментальные значения и две конфигурации расчёта, удельный поток чел/(с·м)

b, м	N	Эксперимент (линия)	Базовая (M0-3, предел 1,42), мин…макс	Δ	В допуске ±20 %	Время выхода, с	Откалиброванная (предел 1,90 чел/(с·м)), мин…макс	Δ	В допуске ±20 %	Время выхода, с
0,7	84	1,90	1,26 (1,21…1,29)	−33,8 %	нет	97,6	1,69 (1,61…1,76)	−11,0 %	да	73,1
1,0	120	1,90	1,33 (1,27…1,38)	−30,2 %	нет	92,3	1,64 (1,59…1,72)	−13,7 %	да	75,0
1,5	180	1,90	1,34 (1,29…1,39)	−29,2 %	нет	91,3	1,76 (1,71…1,80)	−7,6 %	да	70,3
2,0	240	1,90	1,37 (1,36…1,39)	−27,9 %	нет	89,5	1,76 (1,68…1,85)	−7,5 %	да	70,2
2,5	300	1,90	1,37 (1,36…1,39)	−27,9 %	нет	89,6	1,81 (1,80…1,83)	−4,5 %	да	68,0
3,0	360	1,90	1,37 (1,34…1,39)	−27,8 %	нет	89,3	1,82 (1,80…1,83)	−4,3 %	да	67,8
4,0	480	1,90	1,39 (1,38…1,40)	−27,1 %	нет	88,3	1,83 (1,79…1,85)	−3,6 %	да	67,3
5,0	600	1,90	1,38 (1,38…1,38)	−27,5 %	нет	88,8	1,82 (1,81…1,84)	−4,1 %	да	67,5

СВОДКА ПО ТРЁМ РЯДАМ

Таблица 85. Сводка по трём рядам и по всем 30 точкам

Ряд	Точек	Базовая: среднее Δ	В допуске ±20 %	точек с расчётным потоком ниже измеренного	ERD	EPC	Откалиброванная (предел 1,90 чел/(с·м)): среднее Δ	В допуске ±20 %	точек с расчётным потоком ниже измеренного	ERD	EPC
Ряд Зайфрида	15	−26,9 %	2 из 15	15 из 15	0,285	1,377	−9,4 %	13 из 15	13 из 15	0,127	1,111
Ряд Кретца	7	−33,1 %	0 из 7	6 из 6	0,336	1,475	−14,9 %	6 из 7	7 из 7	0,178	1,153
Обобщённая линия	8	−28,9 %	0 из 8	8 из 8	0,290	1,406	−7,0 %	8 из 8	8 из 8	0,078	1,074
Все три ряда	**30**	**−28,6 %**	**2 из 30**	**30 из 30**	**0,299**	**1,405**	**−9,6 %**	**27 из 30**	**28 из 30**	**0,131**	**1,110**

Размах по трём расстановкам составляет 0,1…31 % от среднего, наибольший – у ряда Зайфрида при N = 20. У ряда Кретца среднее Δ и число точек с расчётным потоком ниже измеренного даны по рабочему диапазону b = 0,4…1,0 м, а ERD, EPC и доля в допуске – по всем семи ширинам, включая b = 1,2 м.

В базовой конфигурации расчётный удельный поток через проём меньше измеренного во всех 30 точках: на −44,5…−14,3 %. В допуск ±20 % входят две точки ряда Зайфрида из тридцати, b = 0,8 м при N = 60 и b = 1,1 м при N = 20. Мера EPC выходит за границу 0,6…1,4 на ряде Кретца и на обобщённой линии. Поскольку расчётный поток меньше измеренного, расчётное время прохода проёма больше экспериментального: базовая конфигурация даёт оценку сверху.

В откалиброванной конфигурации в допуске ±20 % 27 точек из 30, среднее отклонение −9,6 %. Меры ERD и EPC укладываются в свои границы на всех трёх рядах. Вне допуска три точки: самая узкая ширина ряда Кретца b = 0,4 м (−31,6 %) и два опыта Зайфрида – b = 1,0 м при N = 40 (−22,0 %) и b = 1,2 м при N = 20 с наибольшим измеренным потоком (−20,6 %). В двух точках расчётный поток больше измеренного (b = 0,8 м при N = 60, +6,6 %; b = 1,2 м при N = 40, +0,4 %), в остальных 28 он меньше.

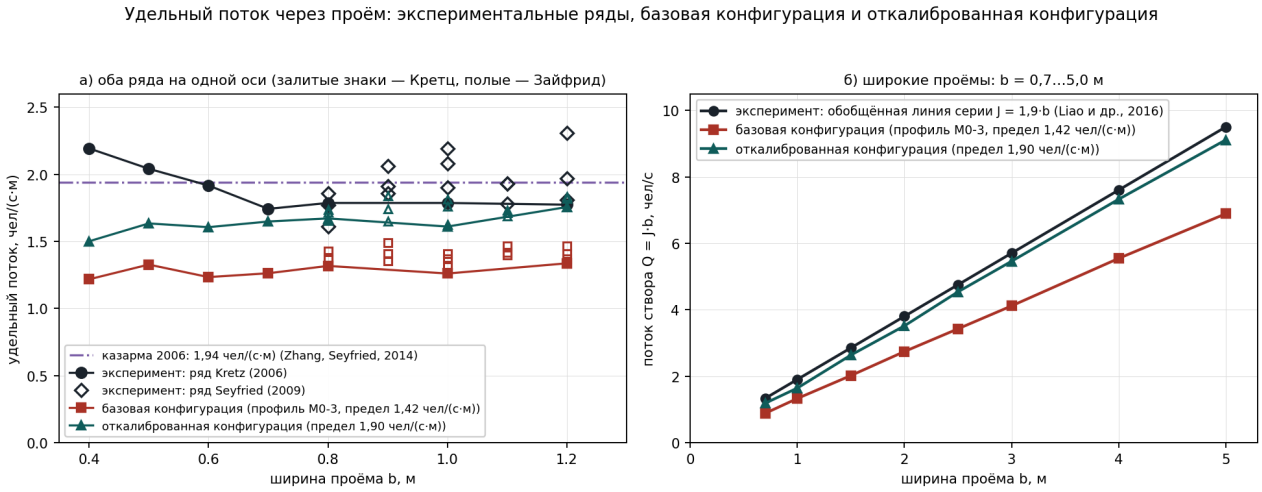


Рисунок 141. Удельный поток через проём: экспериментальные значения обоих рядов, линия казармы 2006, базовая конфигурация с пределом 1,42 и откалиброванная с 1,90 чел/(с·м) при том же профиле M0-3. На правой панели широкие проёмы b = 0,7…5,0 м

СОПОСТАВЛЕНИЕ СО ЗНАЧЕНИЯМИ МЕТОДИКИ

Методика задаёт для дверного проёма два значения: наибольший удельный поток и интенсивность при максимальной плотности q_{Dmax}, зависящую от ширины [1, табл. П2.8]. Измеренные значения лежат **между** ними, а на узких проёмах отличаются от нижней ветви в 1,7…3,3 раза.

Таблица 86. Интенсивность при максимальной плотности по методике и измеренные значения обоих рядов

b, м	q_{Dmax} [1, табл. П2.8], м/мин	То же в чел/(с·м)	Эксперимент, чел/(с·м)	Отношение
0,4	4,00	0,67	2,19 (Кретц)	**измеренное значение выше в 3,3 раза**
0,6	4,75	0,79	1,92 (Кретц)	в 2,4 раза
0,8	5,50	0,92	1,79 (Кретц), 1,61…1,86 (Зайфрид)	в 1,8…2,0 раза
1,0	6,25	1,04	1,79 (Кретц), 1,90…2,19 (Зайфрид)	в 1,7…2,1 раза
⩾ 1,6	8,50	1,42	≈ 1,90 (линия серии, казарма)	в 1,3 раза

Верхняя граница той же таблицы в опытах не достигается ни на одной ширине до 5 м.

ФИЗИЧЕСКОЕ ОБЪЯСНЕНИЕ

При снятом ограничении механика движения агентов пропускает через створ этих ширин 2,4…2,6 чел/(с·м). Такое значение задаётся размером проекции вдоль движения и скоростью на подходе (раздел 2.6). Измеренная ёмкость 1,90…1,93 чел/(с·м) лежит между пределом методики и этим значением. Предел, заданный на измеренном уровне, ограничивает поток в створе и уменьшает средний модуль отклонения с 28,6 до 10,1 %. Свойства профиля влияют только на время подхода к проёму.

Рост потока на узких проёмах в расчёте не воспроизводится. Проекция агента не разворачивается, и её продольный размер один и тот же при любой ширине створа (раздел 2.2). Измеренного габарита участников ни один из двух источников не содержит, поэтому оснований задать другую площадь проекции нет. В опыте участник, проходя проём 0,4 м, разворачивает корпус и занимает вдоль движения 0,25…0,28 м вместо 0,45 м.

ЧТО ОСТАЁТСЯ НЕВОСПРОИЗВОДИМЫМ

1. **Рост удельного потока при сужении проёма** (у Кретца 22 % между b = 1,0 и 0,4 м): габарит

участников не измерялся, и оснований для уменьшения площади проекции нет.

1. **Ёмкость узких проёмов выше 1,90 чел/(с·м)**: предел потока проёма задан одним числом на все

ширины. При b = 0,4…0,6 м расчётный поток поэтому меньше измеренного на −31,6…−16,2 %, и зависимость ёмкости от ширины и типа узла одним значением предела не передаётся (приложение Г8).

1. **Разброс между опытами при одинаковых условиях**: ±9 % у Зайфрида и 16…64 % по интервалу между

проходящими у Кретца при размахе расчёта 0,1…31 %.

1. **Обобщённая линия как самостоятельный опыт**: в обзоре [32] названы только наклон и

диапазон ширин. Точка b = 1,2 м ряда Кретца в опыте ограничена скоплением позади проёма, которого в модели нет.

Г7.4 Выводы

В базовой конфигурации, с профилем M0-3 и нормативным пределом потока проёма, расчётный удельный поток через проём меньше измеренного во всех точках трёх рядов, в допуске единичные точки, мера EPC вне своей границы на ряде Кретца и на обобщённой линии. Меньший расчётный поток означает большее расчётное время прохода проёма: расчёт по методике даёт оценку сверху.

В откалиброванной конфигурации изменено одно значение: предел потока проёма задан по ёмкости створа, измеренной группой Forschungszentrum Jülich по траекториям опытов в казарме Дюссельдорф 2006 (приложение Г6); профиль и его параметры остались табличными. В допуске почти все точки, меры ERD и EPC укладываются в свои границы на всех трёх рядах. Вне допуска остаются самая узкая ширина ряда Кретца и два опыта Зайфрида: измеренный рост удельного потока при сужении проёма модель не воспроизводит.

Ограничение применения в рассмотренных постановках: предел [1, табл. П2.8] обязателен для расчёта пожарного риска, а расчёт с измеренным пределом служит проверкой модели движения и расчётом по методике не считается. Согласование проверено в испытанном ряду ширин для здоровых взрослых, идущих без спешки.

Приложение Г8. Узлы Jülich: Т-слияние, поворот и сужение

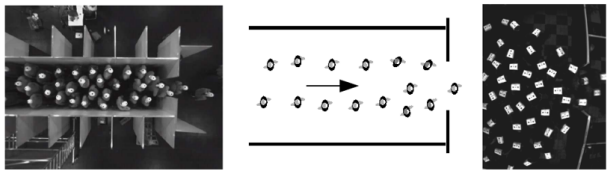
Г8.1 Источник и данные

Приложение содержит валидацию по серии лабораторных опытов группы Forschungszentrum Jülich 2006 и 2009 годов [31;30], в которых измерена пропускная способность узлов пути эвакуации – мест, где поток перестраивается: сужения, поворота и слияния двух потоков в один. Эти опыты включены в документ потому, что методика таких мест отдельно не описывает. Влияние поворота пути предписано не учитывать [1, прил. № 5], слияние описано формулами упрощённой аналитической модели. В индивидуально-поточной модели пропускная способность узла получается из правил движения отдельных агентов, а не задаётся настройкой. Её сравнение с измеренной показывает, что именно воспроизводит модель. Допуск валидации ±20 % по каждой точке (раздел 1.4). Для сведения по ряду из семи точек приводятся меры ERD ⩽ 0,45 и EPC 0,6…1,4 [43].

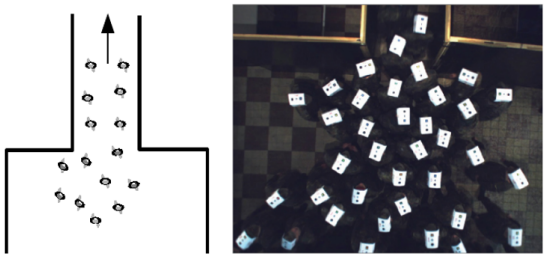
Сняты четыре геометрии, через которые проходит поток одного состава: **короткий проём** в тонкой стене, **длинное сужение** длиной 4 м, **Т-образное слияние** двух встречных потоков в один и **поворот коридора на 90°**. По траекториям участников вычислена ёмкость узла – наибольший установившийся поток через него. Термин «узел» взят из источника. Ряд ширин казармы 2006 года, откуда взяты короткий проём и длинное сужение, разобран в приложении Г6.

Результат опыта: **ёмкость узла зависит от его типа, а не только от ширины** При ширине 2,4 м измеренная ёмкость четырёх геометрий составляет 2,30 / 1,90 / 1,70 / 1,45 чел/(с·м), отношение наибольшего значения к наименьшему 1,59. Руководства и пособия, исходящие из единой зависимости «плотность–поток», расходятся с этим результатом [31, § 3.2]. Обозначения: **b** – ширина узла. У Т-образного слияния так обозначена ширина магистрали. Удельный поток обозначен **J**, чел/(с·м). Поток створа **Q** измеряется в чел/с. Прямые источника Q = 2,30·b, 1,90·b, 1,70·b и 1,45·b имеют угловые коэффициенты, равные ёмкостям J.

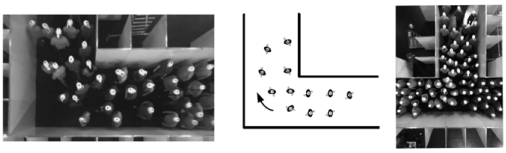
Четыре типа узлов в опытах Jülich: что измерено в эксперименте



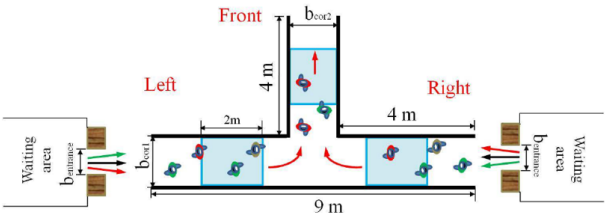
а) короткий проём: схема и кадры съёмки (по Zhang, Seyfried 2014, рис. 1)



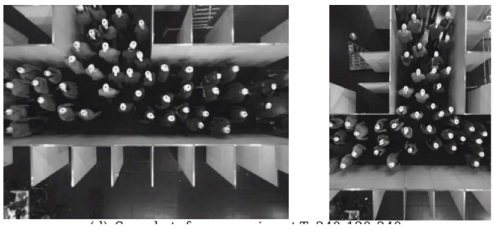
б) длинное сужение: схема и кадры съёмки (по Zhang, Seyfried 2014, рис. 3)



в) поворот 90°: схема и кадры съёмки (по Zhang, Seyfried 2014, рис. 5)



(c) Sketch of experiment at T-junction

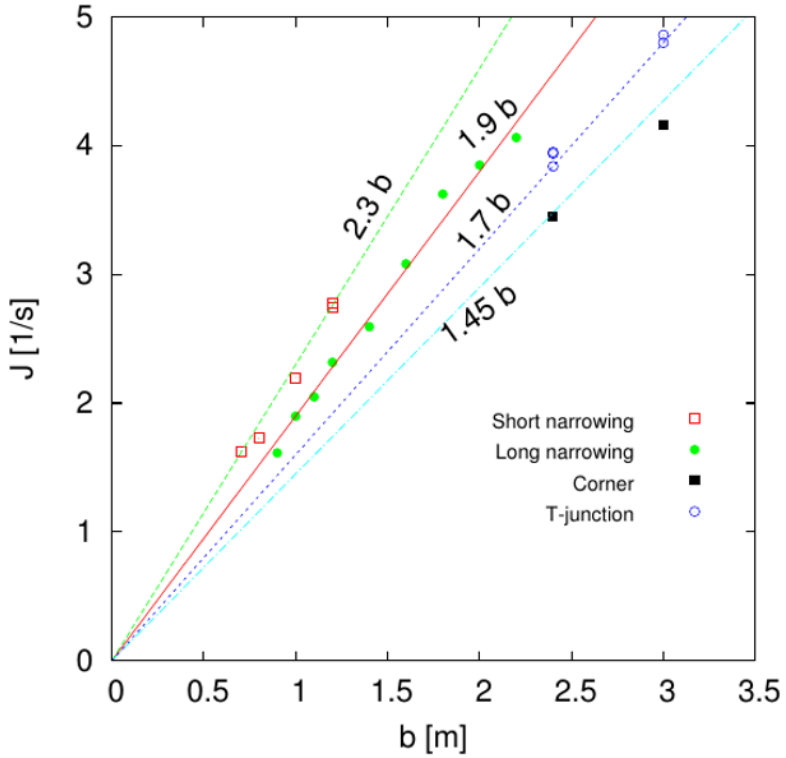


г) Т-образное слияние: схема установки и кадры съёмки (по Zhang и др. 2011, ри

Короткий проём, длинное сужение и поворот — выставочный зал Дюссельдорфа 2009 г. и зал казармы 2006 г. (Zhang, Seyfried 2014);
Т-образное слияние — выставочный зал Дюссельдорфа 2009 г., ширина коридоров 2,40 м (Zhang и др. 2011).

Рисунок 142. Четыре типа узлов в опытах Jülich: схемы установок и кадры съёмки. Короткий проём, длинное сужение и поворот по [31], рис. 1, 3 и 5. Т-образное слияние по [30], рис. 1в и 1г

Натурный эталон: ёмкость зависит от типа узла, а не только от ширины



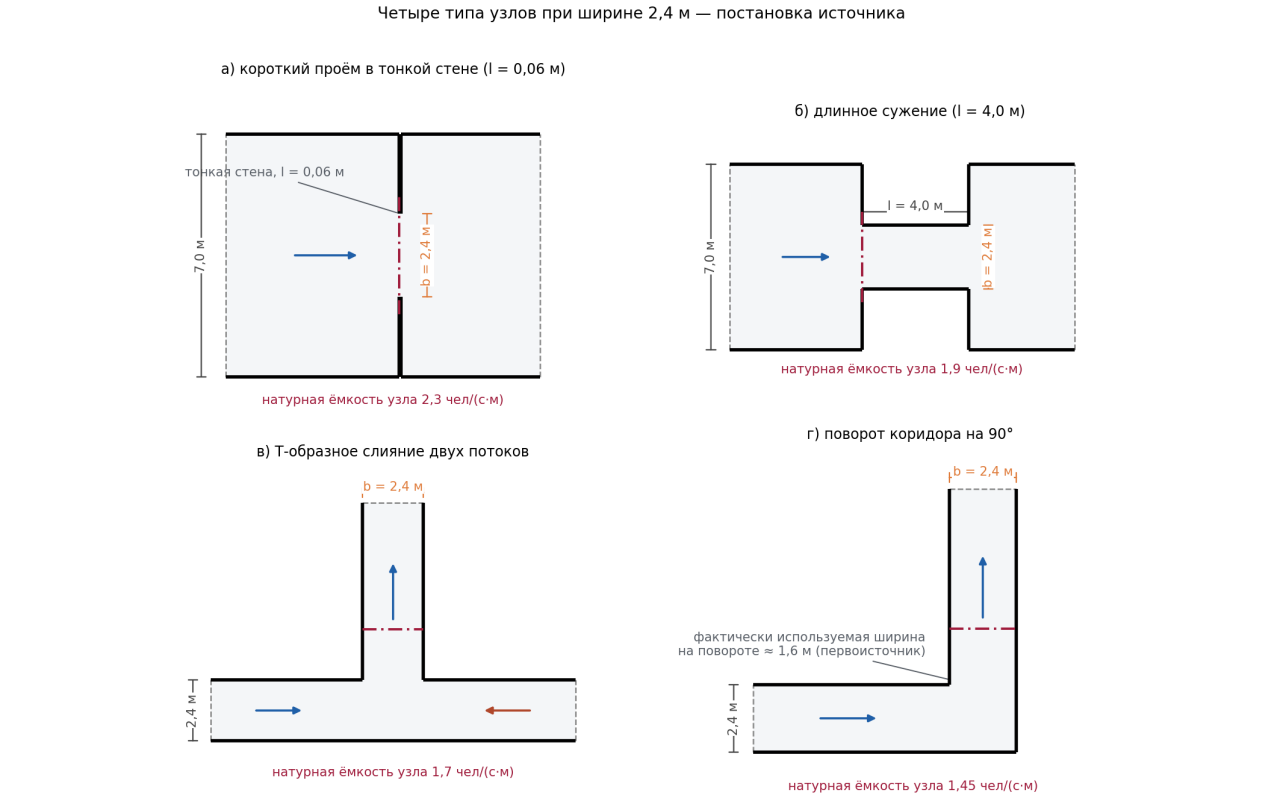
Ёмкость четырёх узлов: Q(b) = 2,30·b; 1,90·b; 1,70·b; 1,45·b чел/с (по Zhang, Seyfried 2014, рис.

«The observed capacities are 2.3, 1.9, 1.7 and 1.45 $(m \cdot s)^{-1}$ in short narrowing, long narrowing, T-junction and corner respectively» — Zhang, Seyfried 2014, § 3.2. Разброс по типам узлов при одн

Рисунок 143. Экспериментальные значения: четыре прямые Q = 2,30·b, 1,90·b, 1,70·b и 1,45·b чел/с. Ёмкость зависит от типа узла, а не только от ширины (по [31], рис. 10)

Таблица 87. Геометрия четырёх постановок (по [31, § 2]; ширины коридоров Т-образного узла – [30, табл. 3])

Узел	Что это в натурном эксперименте	Ширина b, м	Людей в опыте
Короткий проём	выход в свободное пространство через стену 0,06 м; зал подхода 7,0 м	1,2 и 2,4	48…238
Длинное сужение	коридор длиной 4,0 м между широким залом и выходным залом	0,9…2,5	170…179
Т-образное слияние	два коридора 2,40 м сходятся в магистраль 2,40 м; подача регулировалась шириной входов 0,50…2,40 м	2,40	132…305
Поворот 90°	коридор поворачивает на 90°, ширина до и после поворота одна	2,40 и 3,00	56…222



Ёмкость узла измерена в опытах Jülich по потоку на установившейся фазе: 2,30 / 1,90 / 1,70 / 1,45 чел/(с·м) — короткий проём, длинное сужение, Т-образное слияние, поворот. Разброс ёмкости по типам узлов — в 1,59 раза, хотя ширина одна и та же: единой зависимости «плотность — поток» для узлов разной геометрии нет. Красный штрихпунктир — створ замера.

Источник постановки: J. Zhang, A. Seyfried. Quantification of bottleneck effects for different types of facilities // Transportation Research Procedia 2 (2014) 51–59, препринт arXiv:1508.06789, § 2 (геометрия) и рис. 10 с § 3.2 (ёмкости); ширины коридоров Т-образного узла — J. Zhang и др., JSTAT (2011) P06004, табл. 3.

Рисунок 144. Постановка источника в размерах: четыре узла при ширине 2,4 м, красным штрихпунктиром показан створ замера

Экспериментальные значения ёмкости приведены в источнике рисунком и текстом § 3.2, по отдельным опытам не опубликованы. Для Т-образного слияния и поворота ёмкость **дополнительно вычислена по траекториям** архива [35] той же мерой и на том же створе, какими измеряется расчётная. Створ взят в 2 м за узлом, установившаяся фаза 10…90 % прошедших, опыты с открытыми входами.

Таблица 88. Ёмкость Т-образного слияния и поворота, вычисленная по опубликованным траекториям

Опыт архива	Ширина коридора, м	Ширина входов, м	N	Поток на установившейся фазе, чел/(с·м)	Максимум по окну 10 с
Т-образное слияние, входы открыты	2,40	2,40	303	**1,64**	1,80
Поворот 90°, входы открыты	2,40	2,40	161	**1,43**	1,58
Поворот 90°, входы открыты	3,00	3,00	222	**1,38**	1,61

Опубликованные значения 1,70 и 1,45 подтверждаются этим вычислением: при открытых входах ёмкость поворота составляет 1,38…1,43 чел/(с·м), поэтому замечание источника о недостаточной подаче, «may result from the insufficient inflow», к ним не относится.

ЧТО ИСТОЧНИКОМ НЕ ЗАДАНО И ЧЕМ ВОСПОЛНЕНО

Таблица 89. Сведения натурного эксперимента, недостающие данные и принятые допущения

Что требуется для расчёта	Сведения источника	Принято при построении модели
План, размеры	геометрии всех четырёх узлов; ширины коридоров Т-образного узла – [30, табл. 3]; контуры – метаданные архива [35]	длины подводящих коридоров и глубина выходного зала; зал за узлом не ограничивает поток
Число людей, состав	по опытам 56…305; студенты и солдаты	N по критерию установившегося потока [32]: 180…400 (125…167 чел/м)
Габарит, площадь проекции f	**не измерялись**	табличное значение методики, одно и то же в обеих конфигурациях (Г8.2)
Скорость свободного движения V_0	**1,55 ± 0,18 м/с** [30, § 2]	в базовой конфигурации табличная 1,67 м/с профиля М0-3 [1, табл. П2.6], в откалиброванной – измеренное значение 1,55 м/с (Г8.2)
Начальная расстановка	подача регулировалась **шириной входов**, плотность зоны ожидания числом не публикуется	плотность расстановки 3,5 чел/м² – **способ подачи отличается от опытного**
Мера и створ	ёмкость = ΔN/Δt на участках, где плотность перед узлом выше, чем за ним [31, § 3.2]; створ в 2 м за узлом, у сужений – линия входа в сужение	поток на установившейся фазе 10…90 % и максимум по окну 10 с на том же створе
Измеренная величина	ёмкости приведены **только рисунком** и текстом	по Т-образному слиянию и повороту вычислены по траекториям архива и совпали с опубликованными
Повторы и разброс	28 + 7 + 36 опытов; разброс показан облаком точек, числом не приведён	5 расстановок; размах 2,0…10,0 % от среднего, в среднем 4,2 %
Траектории, видео	**опубликованы**: ped.2009.7, ped.2009.8, ped.2006.2 [35], CC BY 4.0	обработаны при подготовке настоящего документа

Полнота данных достаточная при трёх допущениях: отличный от опытного способ подачи людей к узлу, неизмеренный габарит человека и ёмкость короткого проёма и длинного сужения, снятая с рисунка источника. Ни одно из них расхождения не объясняет: размах результата по начальным числам расстановки составляет в среднем 4,2 % при расхождении с экспериментом +23,5…+81,8 % в базовой конфигурации и −17,5…−0,1 % в откалиброванной.

Г8.2 Расчётная модель и конфигурации расчёта

Каждый узел собран **внутри одного помещения**: подводящие коридоры, сечение узла и зал за ним заданы одним помещением. Объекты «дверь» внутри не задаются, и предел потока проёма не действует нигде, кроме выхода в конце, ширина которого поток не ограничивает. Так же строятся слияние, поворот и сужение в расчёте здания (раздел 2.6), поэтому эти постановки показывают работу модели движения без ограничения потока створом. Расстановка равномерно случайная с плотностью 3,5 чел/м² в подводящих коридорах, по пять начальных чисел расстановки на точку. Число людей принято по критерию установившегося потока $N/b \geqslant 115$ чел/м [32], здесь 125…167 чел/м. Время начала эвакуации ноль. Точек семь: четыре типа узла, у двух из них по две ширины. Расчётный поток измеряется на том же створе, что и экспериментальный: у Т-образного слияния и поворота – на линии в 2 м за узлом в отводящем коридоре, у короткого проёма и длинного сужения – на линии входа в сужение, по которой вычислен эксперимент казармы 2006 года (приложение Г6).

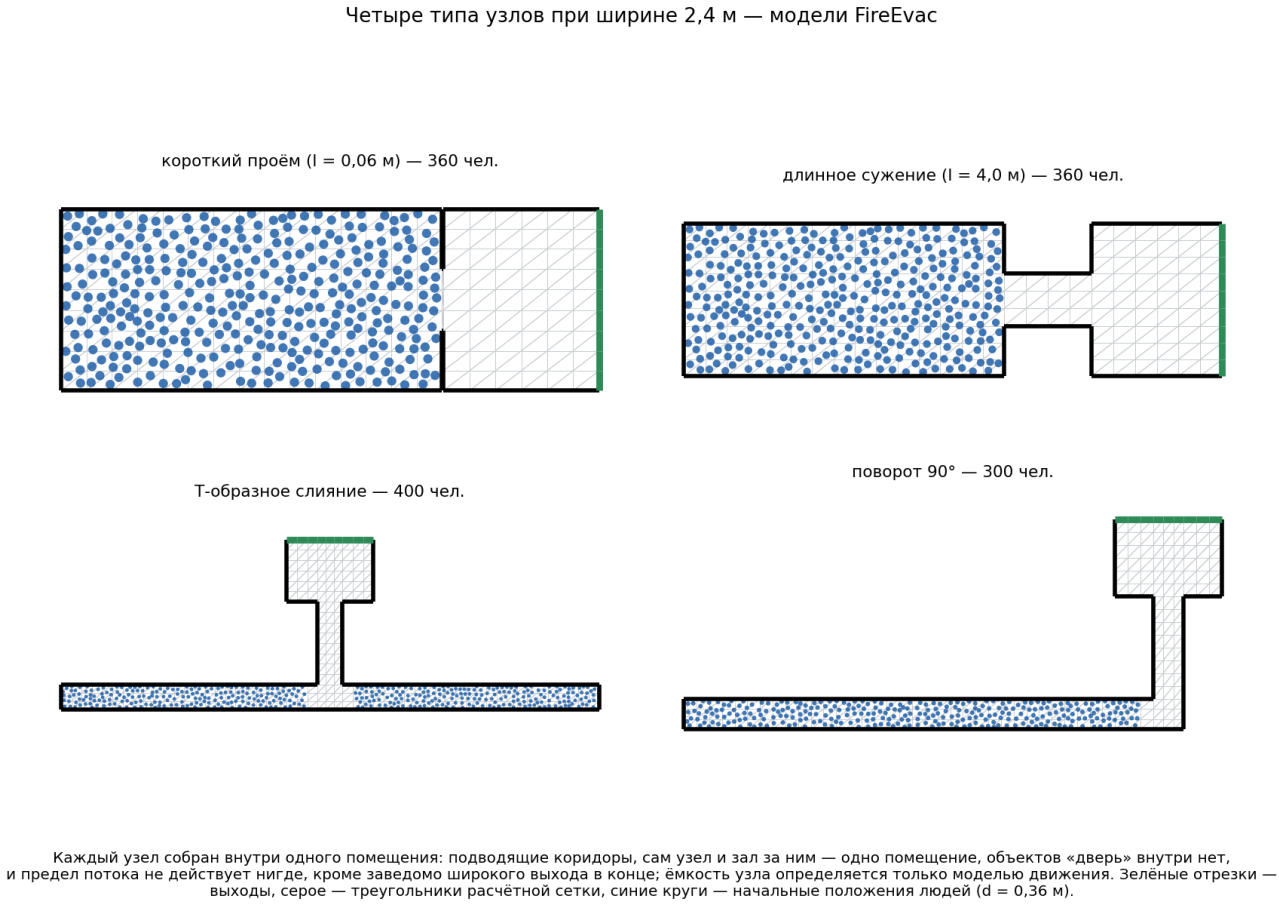


Рисунок 145. Планы моделей четырёх узлов при b = 2,4 м: зелёным показан выход, серым треугольники расчётной сетки, синими кругами начальные положения

Профиль базовой конфигурации – М0-3 (летняя одежда) предписан контингенту опыта, здоровым людям трудоспособного возраста группы М0, и классу Ф4.3 [1, табл. П2.3]. Параметры табличные: V_0 = 1,67 м/с, a = 0,295, D_0 = 0,51 чел/м², f = 0,1 м², диаметр проекции 0,357 м [1, табл. П2.6].

Профиль откалиброванной конфигурации составлен из измеренных в опыте величин. Скорость свободного движения 1,55 ± 0,18 м/с измерена в коридорном опыте Jülich 2009 [30, § 2]; там же измерена кривая «скорость–плотность» однонаправленного потока, и она задана таблицей: доля скорости свободного движения равна 0,871 при плотности 0,5 чел/м², 0,710 при 1,0; 0,471 при 2,0; 0,323 при 3,0; 0,226 при 4,0; 0,168 при 5,0 и 0,097 при 9,0 чел/м². Площадь проекции оставлена табличной, 0,10 м², как в базовой конфигурации: габарит участников ни один источник не приводит. Узлы сняты в опытах 2014 года, а профиль – в коридоре 2009, поэтому здесь он проверяется переносом на другой опыт той же группы и того же контингента. Почему профиль библиотеки методики этим опытам не отвечает, разобрано в приложении Г6.

Таблица 90. Конфигурации расчёта

Параметр	Базовая конфигурация	Откалиброванная конфигурация	Источник значения
Профиль	M0-3 (летняя одежда)	по измеренным V_0 и кривой «скорость–плотность»	базовая – контингент и класс функциональной пожарной опасности [1, табл. П2.3]; откалиброванная – обе величины измерены в коридорном опыте Jülich 2009 [30]
Скорость свободного движения V_0	1,67 м/с (100 м/мин)	**1,55 м/с** (93,0 м/мин)	базовая – [1, табл. П2.6]; откалиброванная – измеренное в опыте значение 1,55 ± 0,18 м/с [30, § 2]
Кривая «скорость–плотность»	(П2.1) при a = 0,295, D_0 = 0,51 чел/м²	**задана таблицей по измеренной**: доля V_0 0,471 при 2 чел/м², 0,323 при 3, 0,226 при 4, 0,168 при 5	базовая – [1, табл. П2.6]; откалиброванная – кривая измерена в коридоре Jülich [30]
Площадь проекции f; диаметр проекции	0,1 м²; 0,357 м	0,1 м²; 0,357 м	[1, табл. П2.6]; измеренного габарита участников ни один источник не приводит, поэтому значение оставлено табличным
Предел потока проёма	**1,42 чел/(с·м)**, но в сечении узла объект «дверь» не задан и предел не применяется	так же не применяется	[1, табл. П2.8]; происхождение числа – раздел 2.6
Изменение относительно базовой конфигурации	–	скорость свободного движения и кривая «скорость–плотность» взяты из опыта	–

Измеренная ёмкость узла в конфигурацию расчёта не переносится: одного значения на все четыре типа нет. Ёмкость длинного сужения 1,90 чел/(с·м) измерена в казарме 2006 года из приложения Г6 и относится к одному типу узла. Обе конфигурации поэтому различаются только профилем группы мобильности. Результат расчёта в узле, где предел потока проёма не действует, зависит в том числе от персональной дистанции профиля, а такой величины в таблицах методики нет (приложение Е).

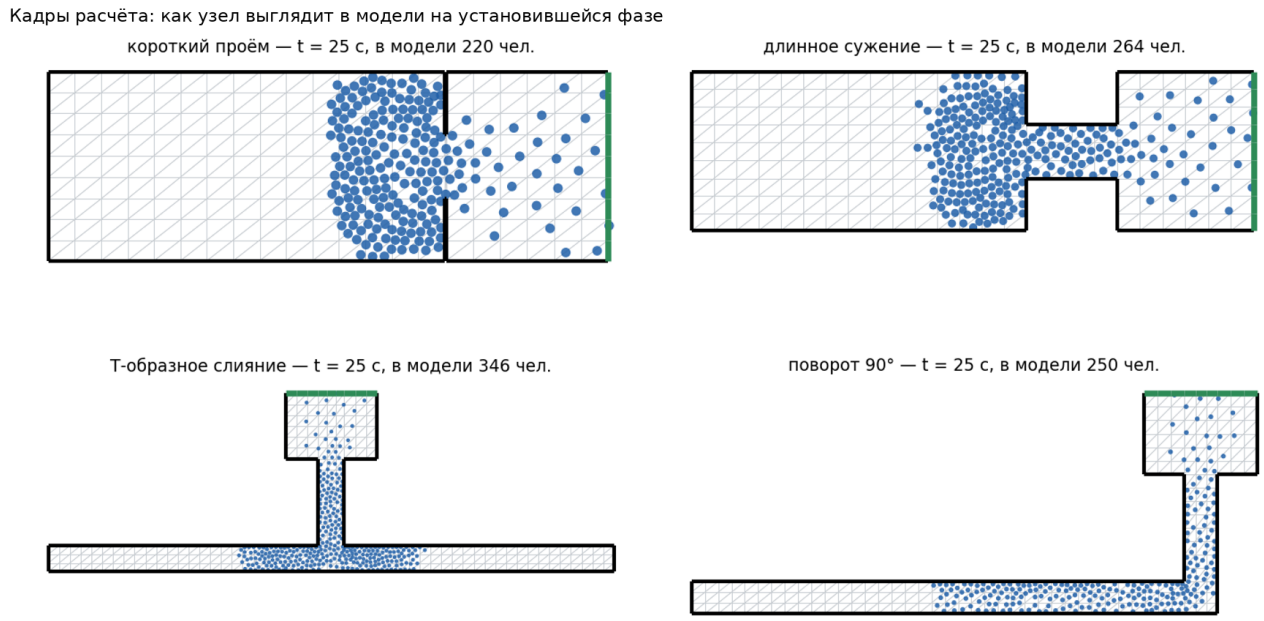


Рисунок 146. Кадры расчёта на установившейся фазе по каждому из четырёх узлов

Г8.3 Результаты и анализ

Отклонение Δ = 100·(расчётное значение − экспериментальное)/экспериментальное вычисляется по ёмкости узла, выраженной удельным потоком. Знак по потоку обратен знаку по времени: если расчётный поток больше измеренного, то расчётное время прохода узла меньше экспериментального (раздел 1.4).

Таблица 91. Ёмкость узла: экспериментальные данные и две конфигурации расчёта

Узел	b, м	N	Эксперимент, чел/(с·м)	Базовая (M0-3), мин… макс	Δ	В допуске ±20 %	Время выхода, с	Откалиброванная (профиль по измеренным V_0 и кривой), мин… макс	Δ	В допуске ±20 %	Время выхода, с
Короткий проём	1,2	180	2,30	2,84 (2,69…2,97)	+23,5 %	нет	58,1	2,00 (1,95…2,05)	**−13,0 %**	да	80,7
Короткий проём	2,4	360	2,30	3,11 (3,08…3,14)	+35,0 %	нет	54,9	1,90 (1,88…1,95)	**−17,5 %**	да	85,5
Длинное сужение	1,2	180	1,90	2,73 (2,69…2,81)	+43,6 %	нет	65,2	1,82 (1,76…1,89)	−4,4 %	да	94,6
Длинное сужение	2,4	360	1,90	3,09 (3,00…3,19)	+62,5 %	нет	60,9	1,78 (1,76…1,80)	−6,4 %	да	100,1
Т-образное слияние	2,4	400	1,70	3,09 (3,02…3,16)	**+81,8 %**	нет	74,5	1,70 (1,68…1,72)	−0,1 %	да	121,3
Поворот 90°	2,4	300	1,45	2,41 (2,39…2,44)	+66,4 %	нет	70,0	1,45 (1,43…1,47)	−0,2 %	да	104,6
Поворот 90°	3,0	375	1,45	2,36 (2,33…2,40)	+62,9 %	нет	71,4	1,42 (1,40…1,43)	−2,3 %	да	107,0

В базовой конфигурации расчётная ёмкость узла больше измеренной во всех семи точках: на +23,5…+81,8 % при среднем модуле 53,7 %. В допуск ±20 % не входит ни одна точка из семи. Во всех семи точках расчётные значения превышают интенсивность горизонтального пути при скоплении, заданную методикой: 13,5 м/мин, или 2,25 чел/(с·м) при f = 0,1 м². Поскольку расчётный поток через узел больше измеренного, расчётное время прохода узла меньше экспериментального: в этих постановках расчёт по методике оценки сверху не даёт.

В откалиброванной конфигурации отклонение составляет −17,5…−0,1 % при среднем модуле 6,3 %: в допуск ±20 % входят все семь точек. Расчётная ёмкость узла ниже измеренной во всех семи, и наибольшая разница – у короткого проёма в стене (−13,0 и −17,5 %); у Т-образного слияния и поворота 90° она не превышает 2,3 %. Порядок узлов по ёмкости совпадает с экспериментальным в откалиброванной конфигурации; в базовой длинное сужение и Т-образное слияние при b = 2,4 м равны между собой в пределах 0,1 %. Отношение наибольшего значения к наименьшему при b = 2,4 м составляет 1,29 в базовой конфигурации и 1,31 в откалиброванной против измеренного 1,59.

Меру ERD ⩽ 0,45 ряд из семи точек выдерживает только в откалиброванной конфигурации: в базовой ERD **0,520** при EPC 0,663, в откалиброванной **ERD 0,105, EPC 0,917**. Мера EPC 0,6…1,4 выполнена в обеих. Расчётное время выхода последнего составляет 54,9…74,5 с в базовой конфигурации и 80,7…121,3 с в откалиброванной. Размах по пяти начальным числам расстановки равен 2,1…10,0 % и 2,0…6,9 % от среднего.

Выбор створа на результат влияет: на выходе модели, в 14 м за узлом, разброс путей в зале за узлом растягивает приход к выходу, и поток там отличается от потока на створе опыта на −6,0…+0,4 %;

наибольшая разница – у Т-образного слияния и длинного сужения 2,4 м. Поэтому замер ведётся на створе опыта.

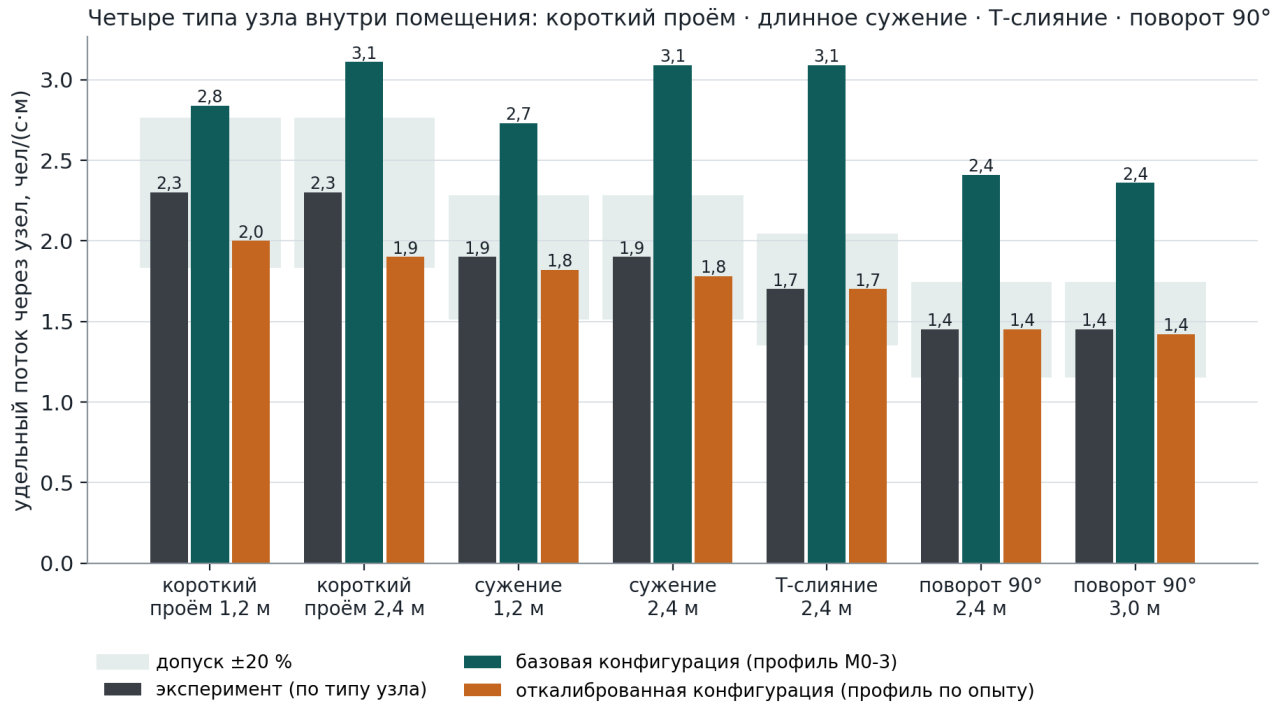


Рисунок 147. Четыре типа узла внутри помещения, удельный поток по семи точкам: экспериментальные значения по типам, базовая конфигурация с профилем M0-3 и откалиброванная с профилем по измеренным V_0 и кривой «скорость–плотность», полоса допуска ±20 %

Время прохода узла источник не публикует, поэтому эталон в эквиваленте времени получен приведением расчёта откалиброванной конфигурации к измеренной ёмкости ($T_э \approx T_р \cdot J_р / J_э$) и составляет 70,2…121,3 с по семи точкам. В базовой конфигурации расчётное время эвакуации меньше этого эталона на −38,6…−17,2 %, в допуске ±20 % одна точка из семи. В откалиброванной отклонение составляет +0,1…+21,2 %, и в допуск входят шесть точек из семи; вне допуска короткий проём при b = 2,4 м. Прямой оценкой служит сопоставление по потоку, эквивалент времени приводится для сопоставимости с другими приложениями.

СОПОСТАВЛЕНИЕ СО ЗНАЧЕНИЯМИ МЕТОДИКИ

Методика задаёт по одному предельному значению интенсивности для двух классов [1, табл. П2.8]. Для дверного проёма это 8,5 м/мин при b ⩾ 1,6 м, для горизонтального пути 13,5 м/мин при скоплении и 16,5 м/мин наибольшее. Измеренные ёмкости четырёх узлов одной ширины различны и лежат между двумя значениями методики: 1,45…2,30 чел/(с·м) при 1,42 и 2,25.

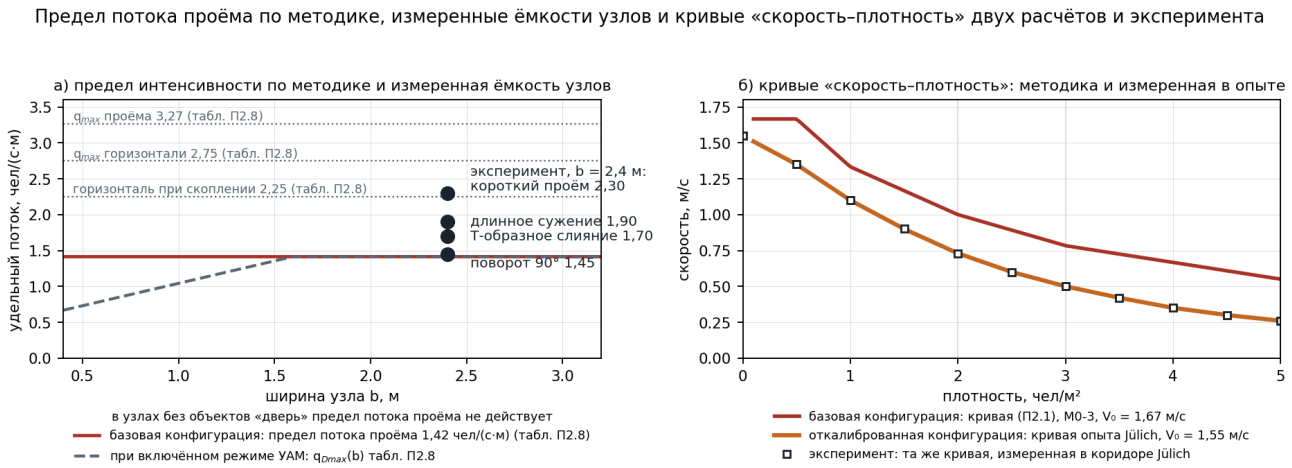


Рисунок 148. На левой панели значения методики и четыре измеренные ёмкости узлов при b = 2,4 м. На правой кривая «скорость–плотность» профиля М0-3, базовая конфигурация, и табулированная кривая откалиброванной конфигурации, которая и есть измеренная в коридоре Jülich [30]: точками показаны её измеренные значения

ФИЗИЧЕСКОЕ ОБЪЯСНЕНИЕ

В узле без объекта «дверь» результат определяют кривая «скорость–плотность» и площадь горизонтальной проекции. Настройки, задающей ёмкость узла, в модели нет (раздел 2.6), поэтому изменение результата при смене профиля здесь больше, чем в постановках с проёмом. При переходе от табличного профиля М0-3 к профилю по измеренным величинам расчётная ёмкость уменьшается с 2,36…3,11 до 1,42…2,00 чел/(с·м), а средний модуль отклонения снижается с 53,7 до 6,3 %. Площадь проекции в обеих конфигурациях одна и та же, 0,10 м², поэтому всё изменение даёт кривая «скорость–плотность»: при 2 чел/м² табличная кривая (П2.1) профиля М0-3 даёт 1,00 м/с, измеренная – 0,73 м/с, при 3 чел/м² – 0,79 и 0,50 м/с. Когда кривая взята из опыта, измеренная ёмкость воспроизводится во всех семи узлах: ни в одном разница не выходит за 17,5 %. Скорости свободного движения двух конфигураций расходятся на 7,2 %, а расчётная ёмкость узла – на 30…45 %.

У поворота и Т-образного слияния ёмкость определяется не сечением, а подходом к нему. На повороте траектории проходят ближе к внутренней стороне и занимают не всю ширину коридора («about 1.6 m» из 2,4 м [31, § 3.1]). В слиянии два потока взаимно ограничивают вход в магистраль. Обе особенности воспроизводятся геометрией модели и кривой «скорость–плотность»: отклонение по этим трём точкам составляет +62,9…+81,8 % в базовой конфигурации и −2,3…−0,1 % в откалиброванной. Ёмкость короткого проёма определяется упаковкой людей в самом сечении, и число полос движения в расчёте меньше наблюдённого.

РАСХОЖДЕНИЯ, НЕ УСТРАНИМЫЕ НАСТРОЙКАМИ

1. **Заниженная ёмкость короткого проёма в откалиброванной конфигурации: −13,0 и −17,5 %**. Это

наибольшее расхождение ряда; все семь точек при этом в допуске ±20 %. Настройкой предела потока проёма оно не изменяется, поскольку в сечении объект «дверь» не задан: изменить его могут только форма кривой «скорость–плотность» и площадь проекции. В базовой конфигурации расчётная ёмкость выше измеренной во всех семи точках, на +23,5…+81,8 %, и в допуск не входит ни одна.

1. **Различие ёмкости короткого проёма и длинного сужения**: в стене толщиной 0,06 м она на +18,7 %

выше при той же ширине, потому что людской поток идёт в три полосы вместо двух [28]. Число полос параметром пользователя не задаётся. Расчётное различие при b = 2,4 м составляет +0,6 % в базовой конфигурации и +6,7 % в откалиброванной.

1. **Разброс ёмкости по типам узлов**: отношение наибольшего значения к наименьшему при b = 2,4 м

составляет 1,59 против 1,29 в базовой конфигурации и 1,31 в откалиброванной. Зависимость воспроизводится по знаку, а по порядку узлов – в откалиброванной конфигурации; по величине не воспроизводится ни в одной.

1. **Используемая ширина на повороте**: в опыте из 2,4 м используется около

1,6 м. В расчёте эта величина не измерялась.

Г8.4 Выводы

В базовой конфигурации, с профилем М0-3 по контингенту и классу функциональной пожарной опасности и без предела потока в сечении узла, расчётная ёмкость узла больше измеренной во всех точках ряда, в допуск не входит ни одна, мера ERD вне своей границы. Знак отклонения означает, что расчётное время прохода узла меньше экспериментального: оценки сверху расчёт по методике в этих постановках не даёт.

В откалиброванной конфигурации изменён один параметр – профиль: он составлен из измеренных в коридорном опыте Jülich 2009 скорости свободного движения и кривой «скорость–плотность» при табличной площади проекции. Ёмкость узла из опыта не переносится, поскольку единого значения на четыре типа узлов нет. В допуске все точки по потоку и все, кроме короткого проёма, по эквиваленту времени; меры ERD и EPC в своих границах. Профиль снят в коридоре 2009 года, а узлы – в опытах 2014 года, поэтому согласие получено переносом профиля на другой опыт той же группы, а не подстройкой под этот ряд.

Ограничение применения в рассмотренных постановках: выводы относятся к узлам испытанных ширин при здоровых взрослых, идущих без спешки. Зависимость ёмкости от типа узла воспроизводится по порядку узлов, но не по величине, поэтому расчёт по узлам этих типов следует считать приближением к измеренному значению, а не его воспроизведением. Расчёт в откалиброванной конфигурации расчётом пожарного риска не служит: параметры профиля взяты из опыта, а не из табл. П2.3 и П2.6 методики.

Приложение Г9. Натурные опыты Академии ГПС МЧС России и профиль курсанта

Г9.1 Источник и данные

Три натурных опыта поставлены Д. А. Самошиным в Академии ГПС МЧС России на одном контингенте: курсантах в форменной одежде. Люди выходили по команде из коридора и из помещения с дверным проёмом. Измерялось время, за которое выходит последний. Опыты отвечают тому случаю, ради которого проверяется модель проёма: узкое место пути – проём шириной 0,80…0,88 м, перед ним образуется скопление, и время выхода определяет пропускная способность створа. Точек тринадцать: три случая размещения в коридоре, восемь значений числа людей в комнате и две серии разной одежды на проёме 0,8 м.

Опыты 1 и 2 опубликованы как тест на точность моделей эвакуации, 2019 г. [26]. Опыт 3 не опубликован: автор предоставил описание установки, таблицы замеров и видеозапись одного повторения [25].

Обозначения: **b** – ширина проёма, в опытах 2 и 3 равная 0,88 и 0,80 м. Коридор шириной 2,0 м. В опыте 1 выход занимает весь торец.

Таблица 92. Три натурных опыта одного контингента

Опыт	Постановка	Измеряемая величина	Экспериментальное значение	Источник
1. Коридор 20 × 2 м (тест 2.3)	выход во всю ширину торца; 2.3.1 – 20 человек на площадке 5 × 2 м у дальнего торца; 2.3.2 – 19 человек равномерно; 2.3.3 – 40 человек равномерно	время выхода последнего, с; V_0 по видеозаписи	20,1 / 14,3 / 18,6 с (титры видеозаписи автора); V_0 = 1,18 (фронт) и 1,3 (замыкающая часть) / 1,66 / 1,3 м/с	[26]
2. Комната 2 × 2 м, проём 0,88 м (тест 2.5б)	N = 4, 8, 12, 16, 20, 26, 31, 35 (плотность расстановки 1…8,75 чел/м²)	время прохода створа последним, с	3,11; 3,33; 4,77; 5,80; 7,29; 9,34; 12,67; 13,71 с	[26]
3. Коридор 2 × 6 м, проём 0,8 м	участок расстановки 3 × 2 м при 5 чел/м², 3 м до проёма, за проёмом свободный зал; лето – 29 человек, f = 0,1 м², 9 повторений; зима – 30 человек, f = 0,125 м², 10 повторений	длительность прохода створа, с	9,99 с (ряд 9,50…10,63); 14,28 с (12,40…15,70)	опыт № 7 [25]

Времена трёх случаев коридора взяты из титров видеозаписи автора. Для случая 2.3.2 сторонний разбор той же записи приводит 13,0 с; сам ролик этого случая длится 15,0 с, и движение в нём идёт с первого кадра, поэтому принято значение автора 14,3 с. Эталон – измеренные времена тринадцати точек. Опыты относятся к валидации, и вывод «в допуске» делается по допуску документа ±20 %. Собственный критерий приёмки источника (±25 % по каждой точке) приводится для сведения.

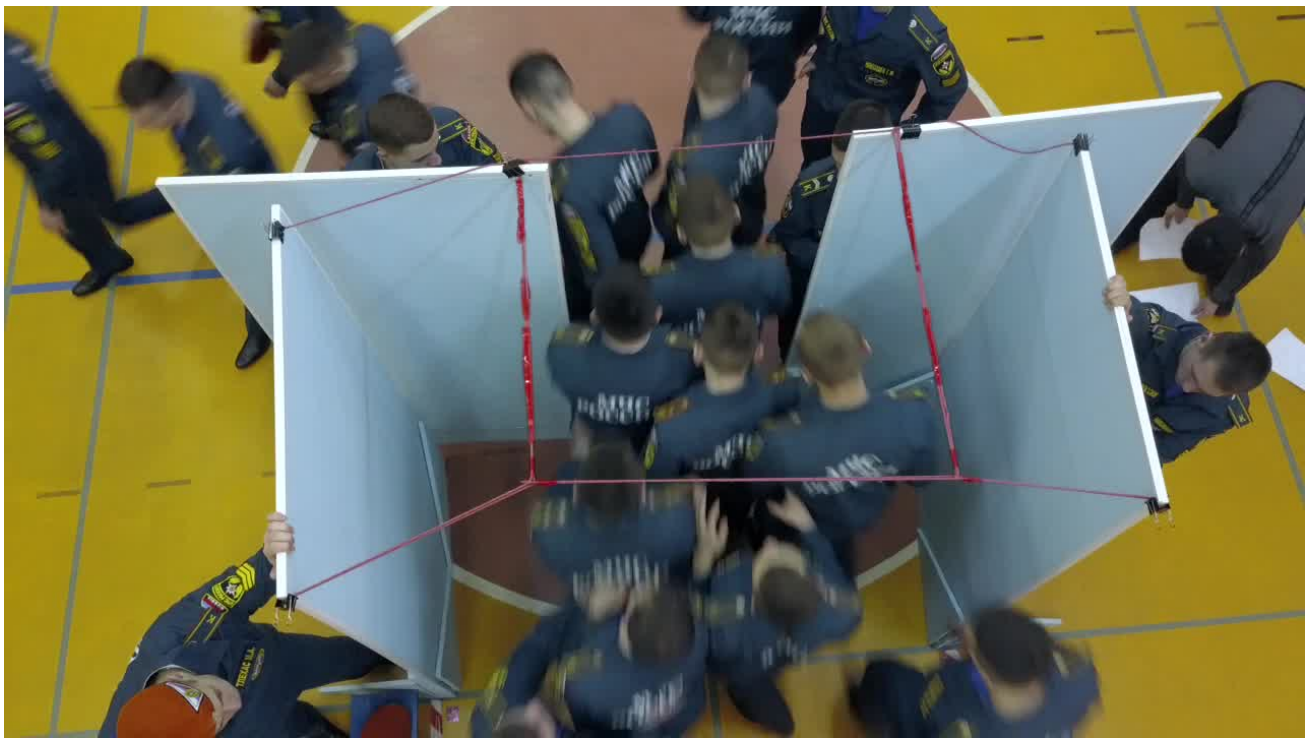


Рисунок 149. Опыт 3, кадр видеозаписи опыта № 7 летней серии: 29 курсантов проходят проём 0,8 м (по [25], видеозапись)

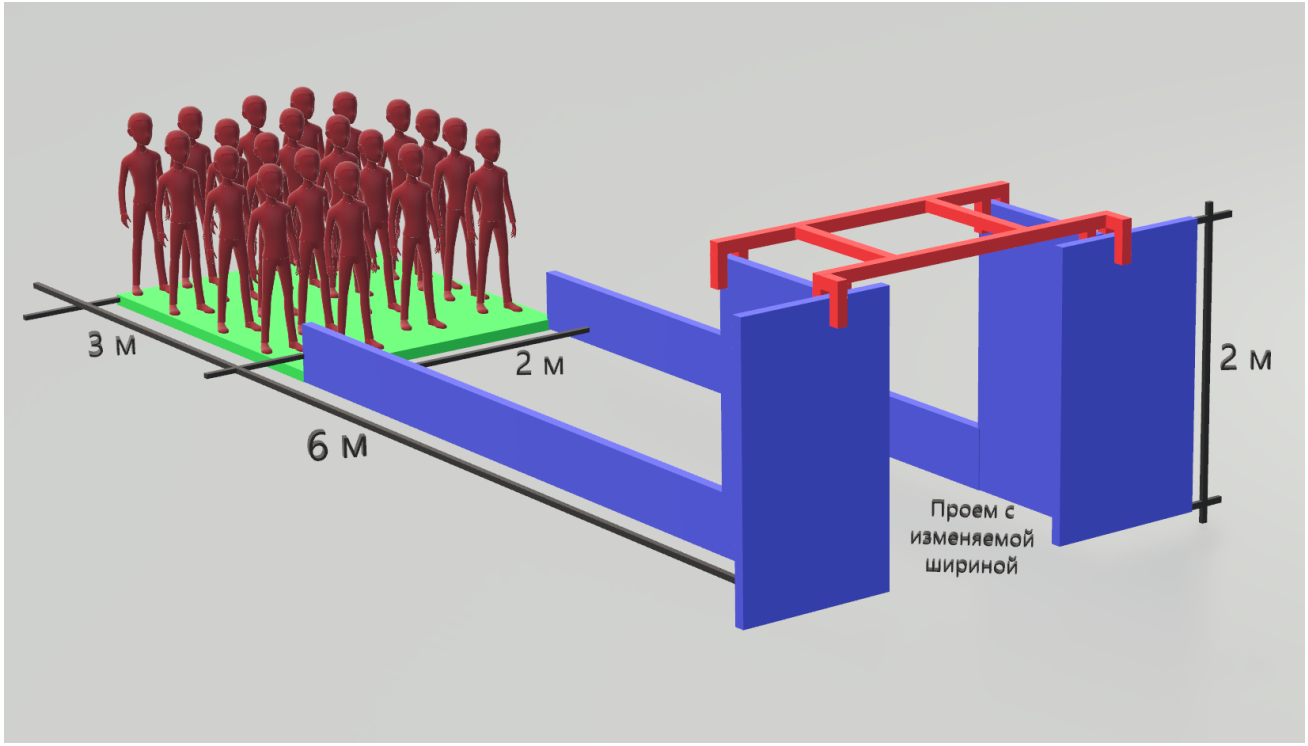


Рисунок 150. Опыт 3, схема установки: коридор 6 м из щитов высотой 2 м, участок расстановки 3 м, проём шириной 0,8 м (по [25], рис. 1)

Ширина коридора 2 м и плоская торцевая стена подтверждены по кадрам видеозаписи: отношение расстояний между щитами и кромками проёма 2,45 при ширине 0,8 м.

Ни один из трёх опытов не задаёт всех данных, необходимых для построения модели. Недостающее восполнено по методике, по антропометрии контингента и по замерам самих опытов.

Таблица 93. Полнота данных трёх опытов

Опыт	Что содержит источник	Чего в нём нет и как это восполнено
1. Коридор 20 × 2 м	размеры, число человек и зоны размещения, время выхода последнего, скорость по видеозаписи в каждом из трёх случаев – при плотности расстановки 0,48, 1 и 2 чел/м²	один повтор на случай; размещение внутри зоны принято случайным; площадь проекции не измерена – принята по антропометрии контингента (Г9.2); время разгона не измерялось – покадровой записи начала движения нет, оно принято по условию опыта (Г9.2)
2. Комната 2 × 2 м, проём 0,88 м	размеры, ширина проёма, восемь значений N и времена прохода створа	один повтор на каждое N; глубина проёма и пространство за ним приняты 0,1 м и 5,9 × 6 м; скорость свободного движения и кривая «скорость–плотность» перенесены из опыта 1; при $N \geqslant 26$ заданная плотность выше той, что укладывается проекциями
3. Коридор 2 × 6 м, проём 0,8 м	план и размеры установки, N и площади проекции обеих серий, полные ряды 9 и 10 повторений, интенсивности	скорость свободного движения и кривая «скорость–плотность» перенесены из опыта 1; площадь проекции принята по методике, и автор опыта отмечает, что она требует уточнения; измеренный интервал не определён и расшифрован как длительность прохода створа: формула $q = N \cdot f \cdot 60/(\Delta t \cdot b)$ воспроизводит все шесть чисел источника, по видеозаписи первый проходит створ на 5,0 с, последний на 15,1 с при паспортных 9,88 с; интенсивность зимней серии вычислена при N = 29 вместо 30
оценка полноты	**данные достаточны с допущениями**	определяющих величин три: площадь проекции контингента, кривая «скорость–плотность» и время разгона. Первые две заменены в откалиброванной конфигурации по антропометрии контингента и по скоростям, измеренным в коридоре опыта 1; третью ни один из опытов не задаёт, и она принята по их условиям (Г9.2)

Г9.2 Расчётная модель и конфигурации расчёта

Постановки собраны по описаниям опытов (таблицы Г9.1). Время начала эвакуации 0, поскольку движение начиналось по команде. В коридоре 20 × 2 м выход занимает всю ширину торца, и расчёты с ограничением потока проёма и без него совпадают. В двух других постановках проём задан геометрией, а створ замера совпадает с его сечением. Расстановка случайная, плотность расстановки 0,48 чел/м² в коридоре, 1…8,75 в комнате, 4,83 чел/м² в опыте 3. При 4,83 чел/м² случайная расстановка проекциями не набирается, поэтому принята гексагональная решётка с малым случайным сдвигом (расстояния между центрами проекций в створе 0,32…0,35 м, шире глубины груди 0,24 м). Каждая точка – среднее по десяти расстановкам, тринадцать точек при двух конфигурациях расчёта составляют 260 расчётов.

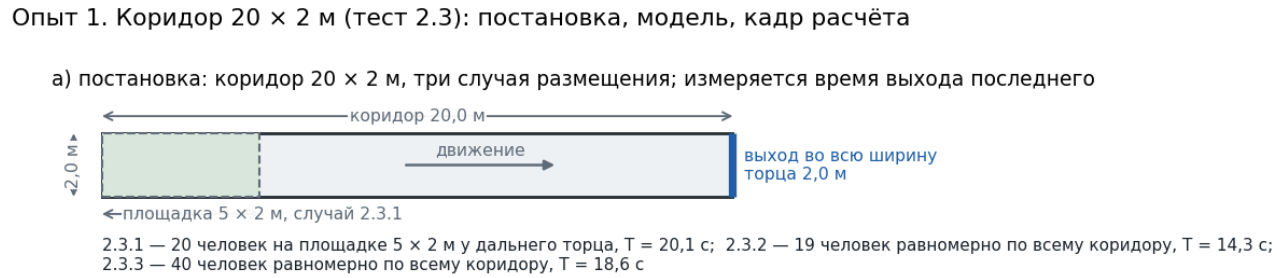


Рисунок 151. Опыт 1, коридор 20 × 2 м: а) постановка с размерами, б) план модели случая 2.3.2 (19 человек, выход во всю ширину торца), в) кадр расчёта на 5-й секунде

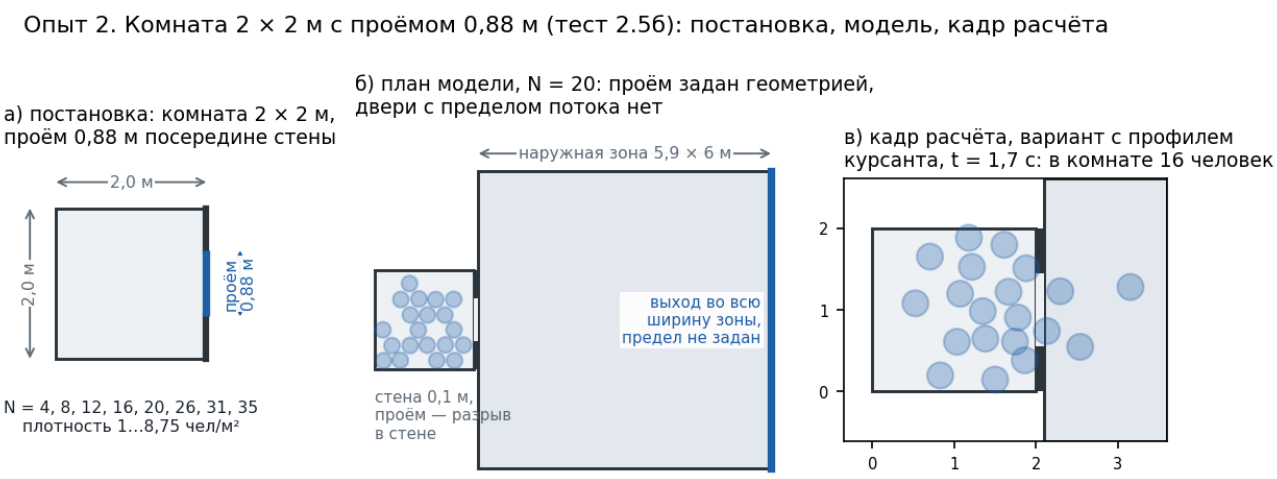


Рисунок 152. Опыт 2, комната 2 × 2 м с проёмом 0,88 м: а) постановка с размерами, б) план модели при N = 20, в) кадр расчёта с профилем курсанта

Опыт 3. Коридор 2 × 6 м с проёмом 0,8 м (опыт Самошина): постановка, модель, кадр расчёта

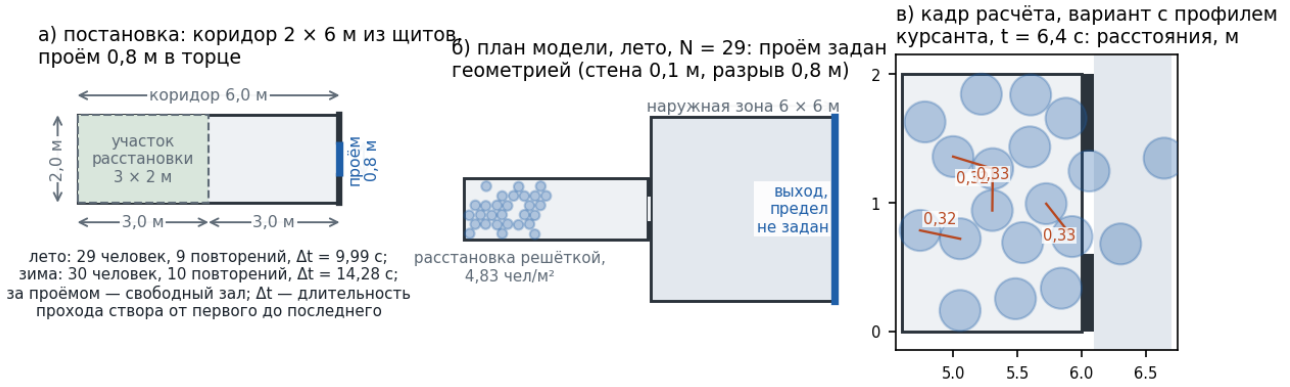


Рисунок 153. Опыт 3, коридор 2 × 6 м с проёмом 0,8 м: а) постановка, б) план модели летней серии, 29 человек на участке 3 × 2 м, в) кадр расчёта в створе (по [25], рис. 1)

Профиль базовой конфигурации назначен по классу здания: опыты поставлены в образовательной организации высшего образования, класс Ф4.2, и табл. П2.3 [1] предписывает для него группу М0-3.

Таблица 94. Конфигурации расчёта приложения Г9

Параметр	Базовая конфигурация: профиль М0-3	Откалиброванная конфигурация: профиль курсанта по условиям опыта	Источник значения
профиль группы мобильности	М0-3 по классу здания Ф4.2 [1, табл. П2.3]	тот же профиль с изменёнными ниже величинами	класс здания – образовательная организация высшего образования
площадь проекции f, лето / зима	0,10 / 0,125 м² [1, табл. П2.5, П2.6]	**0,08 / 0,10 м²**	антропометрия контингента и замеры отечественных натурных серий [9, табл. 7.6;11, прил. 1]; зимняя – по правилу «увеличить на 25 %» [1, примечание к табл. П2.6]
эллипс проекции (ширина плеч × глубина груди)	0,46 × 0,28 м [1, табл. П2.5]	0,44 × 0,24 м	то же
круг расхождения, Ø = 2·√(f/π)	0,357 / 0,399 м	0,319 / 0,357 м	вычисляется из площади проекции
проходной диаметр	0,28 / 0,313 м [1, табл. П2.5]	**0,24 / 0,268 м**	глубина груди контингента – малая ось того же эллипса; зимой ×√1,25
скорость свободного движения V_0	1,667 м/с, 100 м/мин [1, табл. П2.6]	**1,66 м/с**, 99,6 м/мин	замер по видеозаписи опыта 1, случай 2.3.2 [26]; в трёх постановках коридора обе конфигурации ведутся с измеренной в этой постановке скоростью (1,18; 1,66; 1,3 м/с); категория условий движения – повышенной активности [9, табл. 3.5]
кривая «скорость–плотность»	(П2.1) группы М0-3: a = 0,295, D_0 = 0,51 чел/м² [1]	**по скоростям, измеренным в коридоре того же опыта**: доля V_0 равна 1,000 при D ⩽ 0,5 чел/м², 0,783 при 1,0 и 0,747 при 2,0; выше – 0,585; 0,498; 0,411; 0,349; 0,286; 0,237; 0,187 при 3…9 чел/м², между узлами линейно	замеры по видеозаписи коридора 20 × 2 м [26]: 1,3 м/с при 1 чел/м² (случай 2.3.3) и 1,24 м/с при 2 чел/м² (среднее 1,18 и 1,3 фронта и замыкающей части случая 2.3.1). Выше 2 чел/м² замеров нет, и кривая продолжена формой (П2.1) группы М0-3, привязанной к точке D = 2
время разгона	1,5 с – значение профилей библиотеки групп М0 и М1	**1,1 с** – значение формата по умолчанию	в опытах не измерялось; принято по их условию – движение начиналось по команде (приложение «Параметры ядра»)
предел потока проёма	1,42 чел/(с·м) [1, табл. П2.8]	**не задан: проём задан геометрией**	ёмкость створов измерена в этих опытах: 1,46…3,63 чел/(с·м) – 1,46…3,16 в комнате 0,88 м и 2,63…3,63 на проёме 0,8 м, то есть выше 1,42

Откалиброванная конфигурация отличается от базовой четырьмя значениями и снятым ограничением потока проёма. Три значения взяты из измерений: площадь проекции – по антропометрии контингента, скорость свободного движения и кривая «скорость–плотность» – по видеозаписи коридора опыта 1. Четвёртое, время разгона, ни один из трёх опытов не задаёт. Четырёх из этих значений в методике нет: площади проекции 0,08 м², лежащей между табличными 0,09 и 0,06 м² [1, табл. П2.6]; проходного диаметра 0,24 м, который методика не нормирует; кривой, заданной таблицей узлов, а не формулой (П2.1); и времени разгона, которого методика не рассматривает вовсе, поскольку (П2.1) описывает установившееся движение. Расчёта без предела в ней тоже нет: табл. П2.8 задаёт предел для проёма любой ширины. Задать вместо нормативного значения измеренную ёмкость створа нельзя: предел может только уменьшать поток (раздел 2.6).

Эллипс «ширина плеч × глубина груди» лежит в основе и методики, и приложения 2 ГОСТ 12.1.004-91 [2], и учебных пособий [8;9;14]. У молодых мужчин ростом 175…180 см в форменной одежде он равен 0,44 × 0,24 м, π/4 · 0,44 · 0,24 = 0,083 м². Взято табличное значение 0,08 м²: оно на 20 % меньше площади и на 11 % меньше диаметра круга расхождения профиля М0-3.

Кривая откалиброванной конфигурации задана таблицей узлов «плотность – доля V_0» и проходит через все скорости, измеренные по видеозаписи коридора: 1,66 м/с при плотности расстановки 0,48 чел/м², 1,3 м/с при 1 чел/м² и 1,18…1,3 м/с при 2 чел/м². При 2 чел/м² методика даёт 0,60 V_0 против измеренных 0,747, то есть скорость курсантов в плотном потоке на четверть выше табличной. Выше 2 чел/м² замеров нет, и кривая продолжена формой (П2.1) группы М0-3, привязанной к точке D = 2: относительное убывание взято у методики, уровень – у опыта.

Время разгона – единственная величина конфигурации, взятая не из замера. В опытах оно не измерялось: покадровой записи начала движения нет. Принято значение формата по умолчанию 1,1 с, отвечающее условию опыта – движению по команде; профили библиотеки методики задают 1,5 с. В модели это время определяет и выход на скорость свободного движения ($a = V_0/\tau$), и дистанцию торможения, которую агент держит до идущего впереди, поэтому от него зависит установившийся поток через створ (приложение «Параметры ядра»).

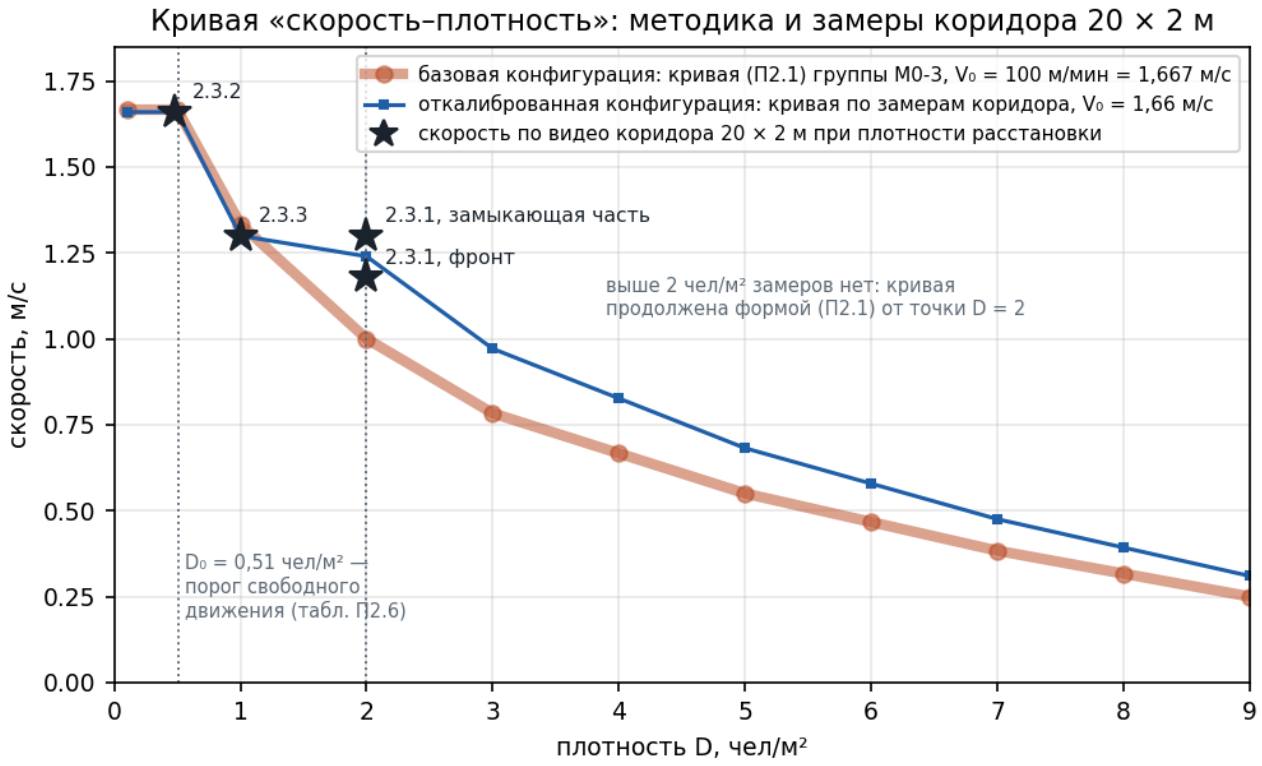


Рисунок 154. Кривая «скорость–плотность» двух конфигураций расчёта: (П2.1) группы М0-3 у базовой и кривая по скоростям, измеренным в коридоре 20 × 2 м, у откалиброванной. Звёздочки – сами замеры по видеозаписи [26]

Замер случая 2.3.2 отвечает свободному участку кривой и взят как V_0 профиля курсанта. Замеры плотных случаев 2.3.1 и 2.3.3 лежат выше кривой (П2.1) методики: по ним и построена кривая откалиброванной конфигурации.

Г9.3 Результаты и анализ

Таблица 95. Тринадцать точек трёх опытов – экспериментальные значения и расчёт в двух конфигурациях (полужирным выделены отклонения вне допуска ±20 %)

Точка	Эксперимент, с	Базовая конфигурация, с	Δ, с	Δ, %	Откалиброванная конфигурация, с	Δ, с	Δ, %	Размах по десяти расстановкам, с
коридор 2.3.1	20,10	24,62	+4,5	**+22,5 %**	23,22	+3,1	+15,5 %	23,0…23,7
коридор 2.3.2	14,30	12,60	−1,7	−11,9 %	12,50	−1,8	−12,6 %	11,0…13,3
коридор 2.3.3	18,60	19,68	+1,1	+5,8 %	19,01	+0,4	+2,2 %	17,9…20,1
комната N = 4	3,11	4,76	+1,7	**+53,1 %**	3,04	−0,1	−2,3 %	2,6…3,5
комната N = 8	3,33	7,00	+3,7	**+110,2 %**	3,91	+0,6	+17,4 %	3,4…4,5
комната N = 12	4,77	10,19	+5,4	**+113,6 %**	4,88	+0,1	+2,3 %	4,0…5,5
комната N = 16	5,80	13,59	+7,8	**+134,3 %**	6,21	+0,4	+7,1 %	5,7…7,1
комната N = 20	7,29	16,66	+9,4	**+128,5 %**	7,42	+0,1	+1,8 %	6,4…9,2
комната N = 26	9,34	23,04	+13,7	**+146,7 %**	9,50	+0,2	+1,7 %	8,2…10,8
комната N = 31	12,67	26,66	+14,0	**+110,4 %**	10,69	−2,0	−15,6 %	9,4…11,4
комната N = 35	13,71	30,36	+16,7	**+121,4 %**	11,68	−2,0	−14,8 %	10,5…12,9
проём 0,8 м, лето	9,99	26,09	+16,1	**+161,2 %**	10,73	+0,7	+7,4 %	9,5…11,8
проём 0,8 м, зима	14,28	27,93	+13,7	**+95,6 %**	12,96	−1,3	−9,2 %	11,0…14,1
средний модуль отклонения				**93,5 %**			**8,5 %**	
в допуске ±20 %				**2 из 13**			**13 из 13**	
в допуске источника ±25 %				3 из 13			13 из 13	
по опытам: коридор / комната / проём 0,8 м				13,4 / 114,8 / 128,4 %			10,1 / 7,9 / 8,3 %	

В коридоре измерено время выхода последнего человека, в комнате – проход створа последним. На проёме 0,8 м измерена длительность прохода створа от первого человека до последнего. В трёх постановках коридора обе конфигурации ведутся с измеренной в этой постановке скоростью свободного движения, узкого места там нет, и разницу между ними создаёт только кривая «скорость–плотность».

В базовой конфигурации в допуск ±20 % попадают 2 точки из 13 (оба случая коридора, −11,9 и +5,8 %). В остальных одиннадцати расчётное время эвакуации больше экспериментального на 22,5…161,2 %, и на обоих опытах с проёмом оно превышает измеренное в 2,0…2,6 раза. Откалиброванная конфигурация укладывается в допуск во всех 13 точках (−15,6…+17,4 %) при среднем модуле отклонения 8,5 %. Расчётное время эвакуации больше экспериментального в восьми точках и меньше в пяти: комната при N = 4, 31 и 35, коридор 2.3.2 и зимняя серия проёма 0,8 м; наибольшее отклонение этой стороны составляет −15,6 %. По критерию источника ±25 % в допуск попадают 3 и 13 точек из 13.

Отклонение уменьшается тремя слоями. Проекция курсанта вместе со снятым ограничением потока проёма – при кривой методики и времени разгона 1,5 с – даёт 6 точек из 13 при среднем модуле 18,7 %: отклонения комнаты и обоих опытов с проёмом уменьшаются с +53,1…+161,2 до −2,5…+42,6 %. Кривая по скоростям коридора добавляет пять точек: 11 из 13 при среднем модуле 13,1 %, вне допуска остаются комната при N = 8 (+37,8 %) и при N = 12 (+22,4 %). Время разгона 1,1 с вместо 1,5 с переводит в допуск и их: 13 точек из 13 при среднем модуле 8,5 %.

От времени разгона результат зависит ощутимо. При 1,25 с комната при N = 8 выходит за допуск (+30,3 %); при 1,0 с все тринадцать точек остаются в допуске, но комната при N = 31 подходит к его границе (−19,3 %); при 0,5 с расчётное время эвакуации в плотных случаях комнаты и в зимней серии меньше экспериментального на 26…29 %. Значение 1,1 с взято не по согласию с опытом, а как значение формата по умолчанию.

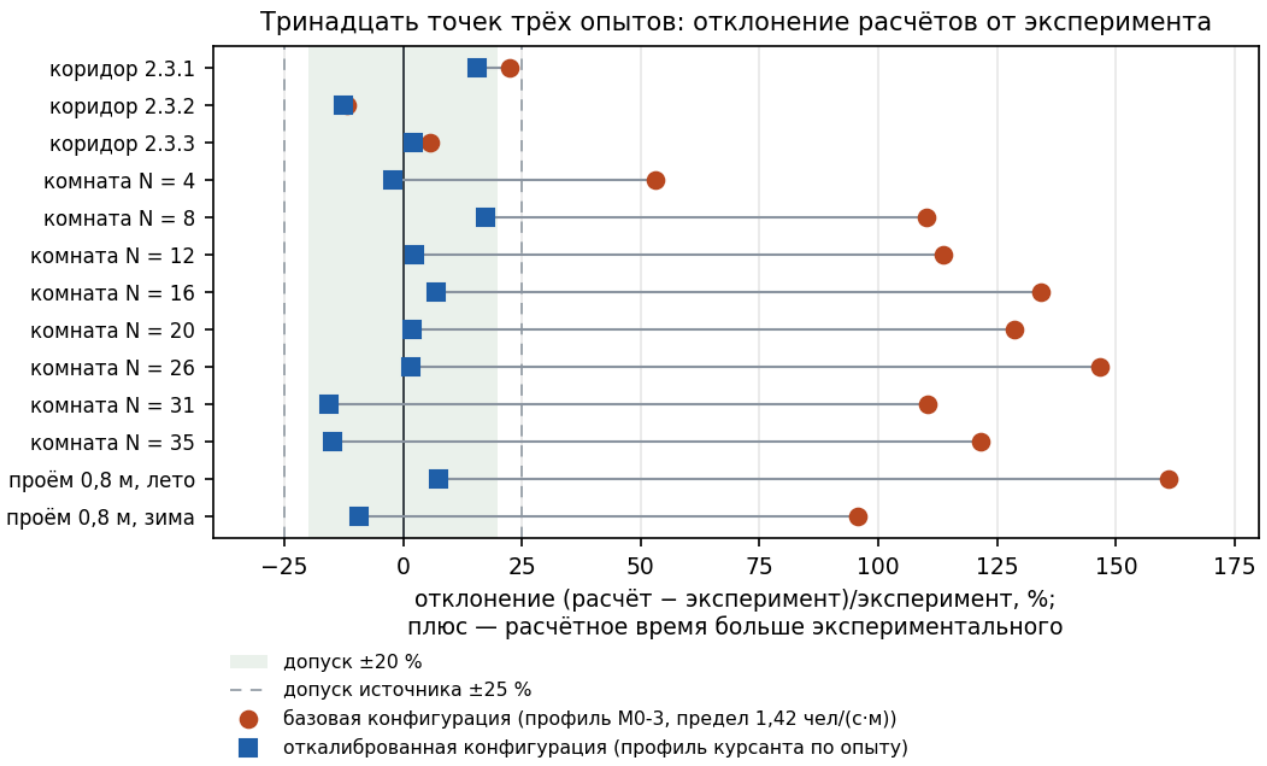


Рисунок 155. Отклонение расчёта от экспериментальных значений по тринадцати точкам трёх опытов. Ряды: базовая конфигурация с профилем M0-3 и пределом 1,42 чел/(с·м), откалиброванная с профилем курсанта по условиям опыта. Полоса – допуск ±20 %, штриховые линии – допуск источника ±25 %

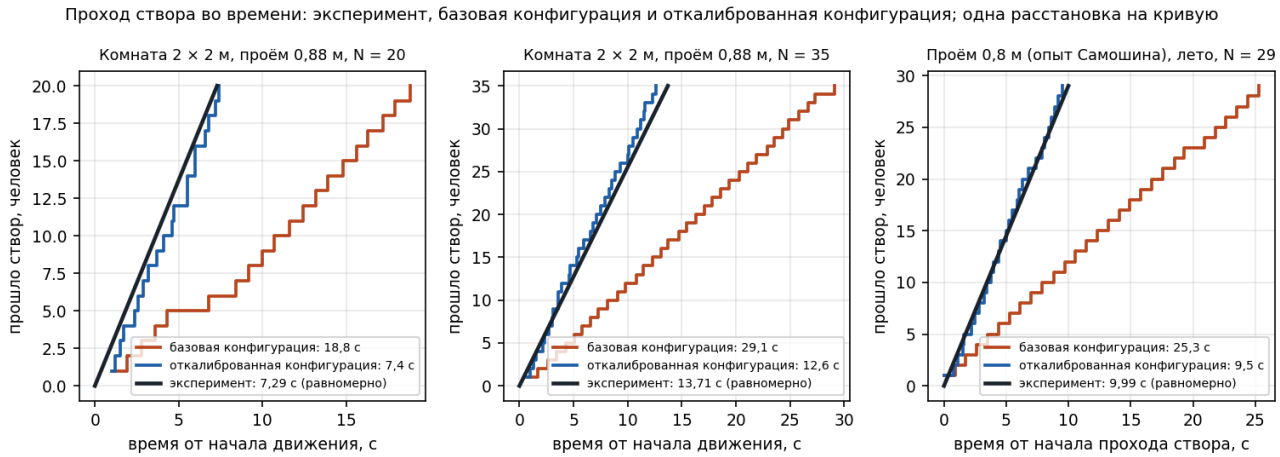


Рисунок 156. Проход створа во времени для комнаты при N = 20 и 35 и для проёма 0,8 м летом, по одной расстановке на кривую: эксперимент, базовая и откалиброванная конфигурации расчёта

Прямая отвечает экспериментальным значениям при равномерном потоке за паспортное время: зависимость в откалиброванной конфигурации следует ей, в базовой наклон вдвое меньше и равен пределу 1,42·b чел/с.

Пока предел действует, время определяется значением N/(1,42·b). При снятом пределе его задают геометрия створа и скорость, с которой люди через него проходят. Люди проходят проём в один ряд (в летней серии центры пересекают створ 0,6…1,4 м в полосе 0,73…1,26 м). Удельный поток через створ равен q = V/(d·b), где d – шаг очереди, равный диаметру круга расхождения, а V – скорость в створе. На проёме 0,8 м летней серии установившийся расчётный поток составляет 1,34 чел/(с·м) в базовой конфигурации, где действует предел; 2,92 при одной заменённой проекции и 3,40 чел/(с·м) в откалиброванной конфигурации, где к проекции добавлены кривая опыта и время разгона 1,1 с. Измеренная ёмкость этой серии 3,63 чел/(с·м), зимней – 2,63 при расчётных 2,89. В комнате 0,88 м при N = 8…35 установившийся расчётный поток равен 2,99…3,61 чел/(с·м), а измеренный по всему проходу створа – 2,73…3,16. Измеренным 3,63 чел/(с·м) при расчётной скорости в створе 0,87 м/с отвечал бы шаг очереди 0,30 м – меньше круга расхождения 0,319 м, но больше глубины груди 0,24 м. Круг, равновеликий эллипсу, вдоль движения на четверть больше (раздел 2.6). Наименьшее расстояние между центрами проекций агентов в створе составляет 0,264…0,269 м.

Скорость свободного движения и кривая «скорость–плотность», измеренные в опыте 1, перенесены в опыты 2 и 3, где параметры по их собственным замерам не назначались. Средние модули отклонения составляют 10,1 % на коридоре, 7,9 % на комнате и 8,3 % на проёме 0,8 м: на опытах, куда параметры перенесены, согласие такое же, как на том, где они измерены. Пока предел 1,42 чел/(с·м) действует, замена профиля результат на проёме меняет мало: на комнате при N = 20 базовая конфигурация и профиль курсанта с тем же пределом дают на одной расстановке одно время прохода створа последним – 18,8 с. В этом и состоит основное ограничение приложения.

Ни одна точка откалиброванной конфигурации не выходит и за допуск источника ±25 %. Наибольшие отклонения – комната при N = 8 (+17,4 %) и при N = 31 (−15,6 %). Точка N = 8 выпадает из самого экспериментального ряда: между N = 4 и N = 8 измеренный удельный поток увеличивается с 1,46 до 2,73 чел/(с·м), почти вдвое при удвоении числа людей. Начальная плотность при N = 31 и 35 (7,75 и 8,75 чел/м^2) выше той, что укладывается проекциями: обе точки лежат на границе применимости расстановки.

Г9.4 Выводы

В базовой конфигурации расчётное время эвакуации больше экспериментального почти во всех точках, а в допуске остаются только точки коридора без проёма. На опытах с проёмом расчётное время превышает измеренное более чем вдвое, поскольку предел табл. П2.8 ниже ёмкости створов, измеренной в тех же опытах.

Откалиброванная конфигурация отличается четырьмя значениями. Три из них – замеры самих опытов: проекция курсанта по антропометрии контингента, скорость свободного движения по видеозаписи и кривая «скорость–плотность» по скоростям, измеренным в коридоре того же опыта. Четвёртое – время разгона, значение формата по умолчанию вместо значения профилей библиотеки: в опытах оно не измерялось и принято по их условию, движению по команде. Вместе с ними снято ограничение потока проёма, поскольку ёмкость створов измерена в самих опытах. При этой конфигурации в допуск входят все точки трёх опытов, и по критерию источника тоже; расчётное время больше экспериментального в большей части точек и меньше в остальных. При исходных данных опыта модель воспроизводит и движение по коридору без узкого места, и проход дверного проёма во всех рассмотренных постановках.

Такая конфигурация расчётом пожарного риска не служит: профиль описывает молодых мужчин в форменной одежде, а время разгона взято не из замера, а из условий опыта. При снятом ограничении потока проёма табл. П2.8 не действует, и расчётный удельный поток через створ кратно выше нормативного. Пока ограничение действует, замена профиля результат на проёме почти не меняет. Для расчёта пожарного риска остаётся базовая конфигурация: профиль М0-3 по табл. П2.3 [1] и нормативный предел потока проёма.

Приложение Г10. Учебные эвакуации NIST по лестницам: четыре здания, десять лестничных клеток

Г10.1 Источник и данные

Лестница – единственный элемент пути эвакуации, по которому есть данные натурного эксперимента о времени выхода людей из целых зданий, а не только об отдельном участке. Учебные эвакуации NIST взяты в документ как проверка расчёта многоэтажной схемы целиком. На них одновременно работают скорость движения по маршу, поворот на промежуточной площадке, вливание потока этажа в лестничную клетку и дверь выхода.

NIST снимал на видео учебные эвакуации 14 офисных и жилых зданий высотой 6…62 этажа: сводный отчёт [45], архив поштучных замеров [46], разбор скоростей по зданиям [47;48]. Сравнение ведётся по четырём офисным зданиям (10, 18, 24 и 31 этаж, десять лестничных клеток, около 3 800 человек). Камеры на площадках этажей [45, § 3.1] фиксируют по каждому человеку этаж входа в клетку, а также времена появления в поле зрения и выхода из него. По этим замерам источник получает [45, § 4.1] локальную скорость вдоль наклона, плотность на площадке и задержку входа в клетку: это время начала эвакуации, включающее путь по этажу [45, табл. 18]. Полное время эвакуации клетки и момент выхода 95 % её населения даны в [45, табл. 19]. Приняты обозначения ширин: **b** для марша (в модели она измеряется между поручнями) и $\mathbf{b_{дв}}$ для двери.



Рисунок 157. Вид с камеры на площадке: линии – границы поля зрения на ступенях сверху и снизу и у двери этажа (по [45], рис. 2)

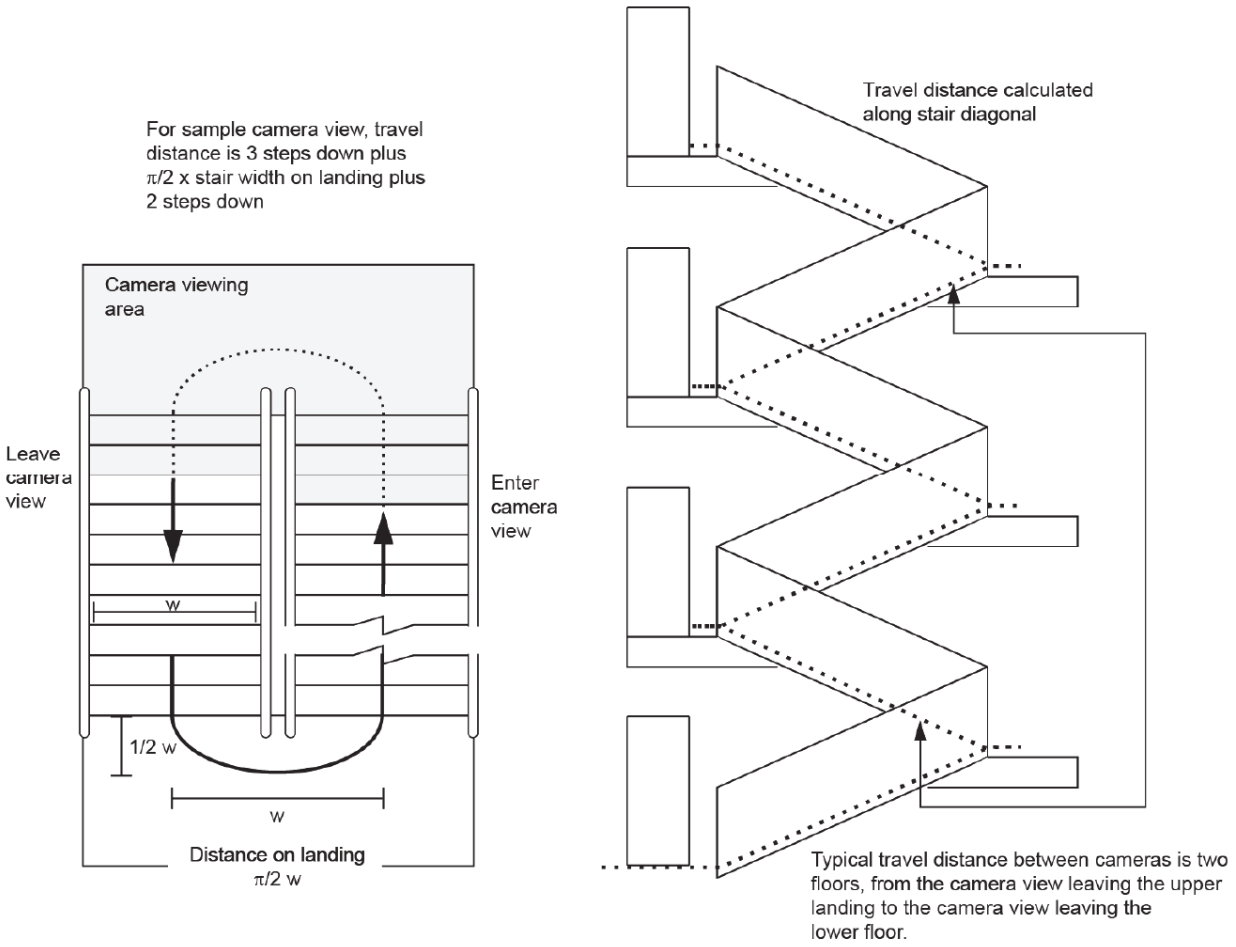


Рисунок 158. Поле зрения камеры и расстояние между камерами, по которому считается локальная скорость: диагональ ступеней плюс дуга по площадке (по [45], рис. 4)

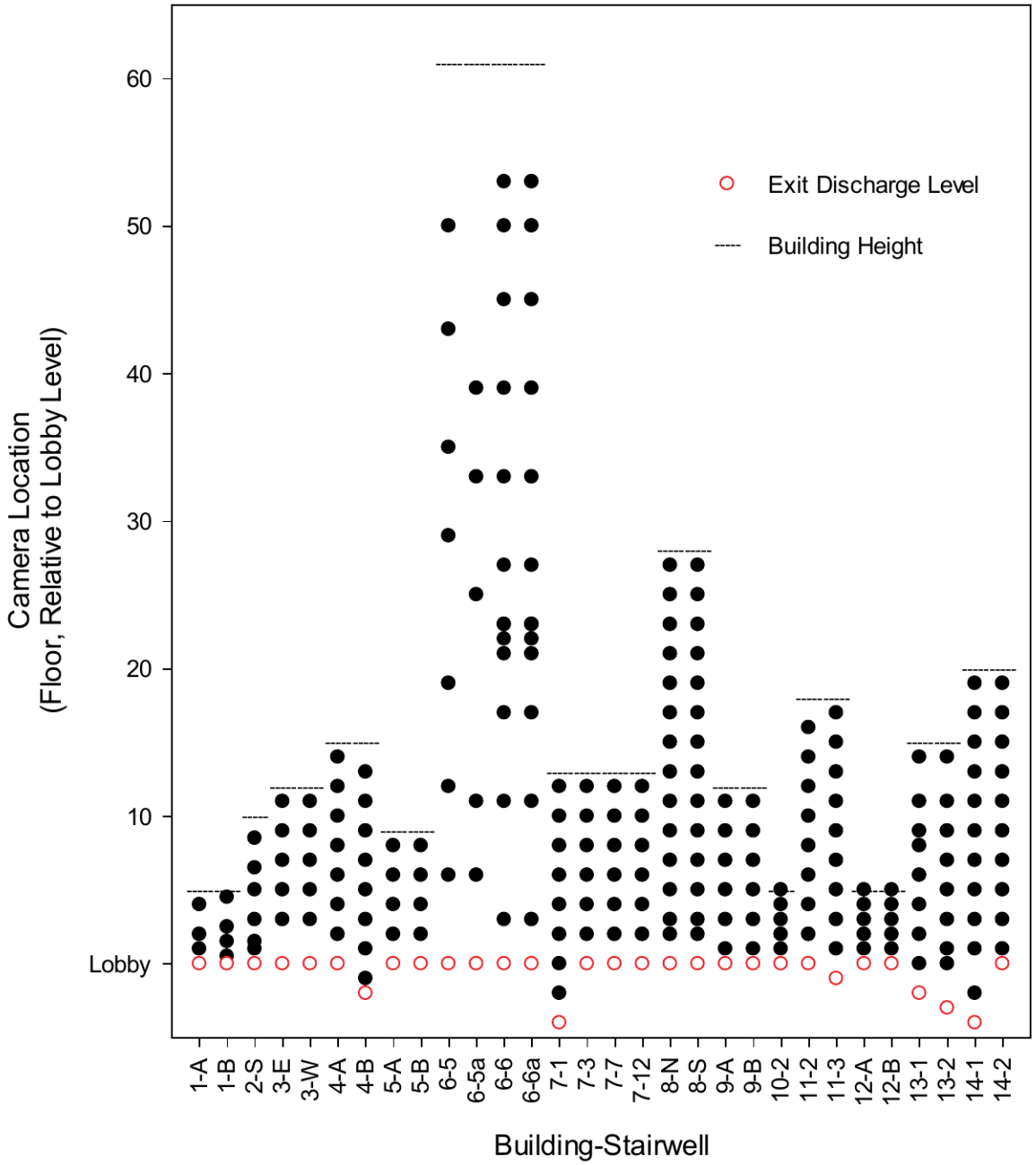
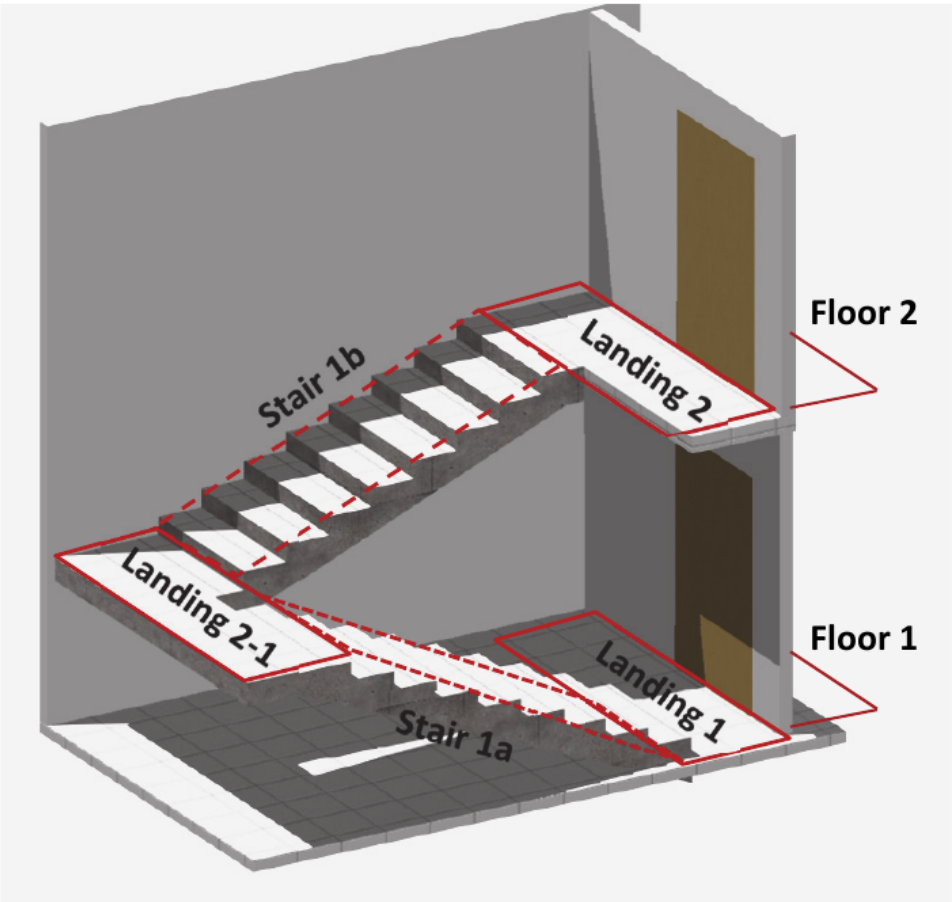


Рисунок 159. Этажи, на которых стояли камеры, по всем 30 лестничным клеткам исследования (по [45], рис. 3)



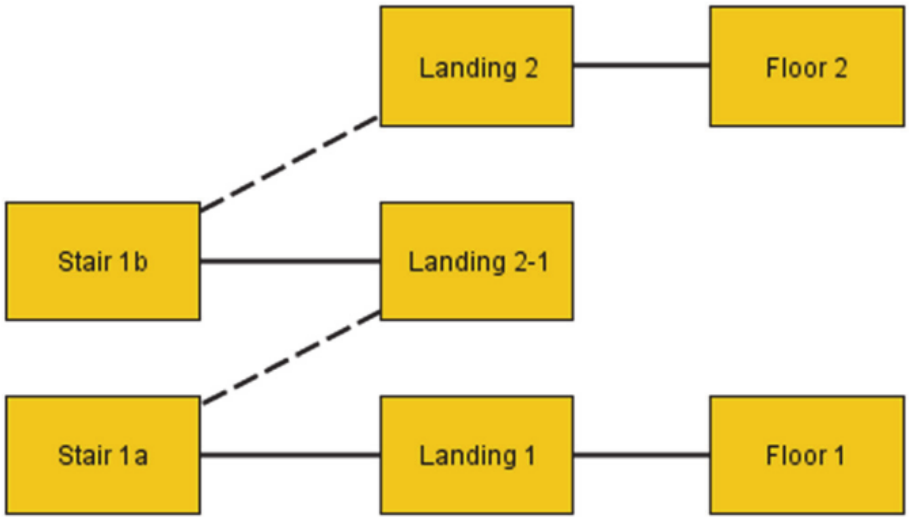


Рисунок 160. Устройство лестничной клетки в зданиях исследования: два марша на этаж, промежуточная площадка, поворот на 180°, дверь с этажа на площадку (по [45], рис. 27)

Таблица 96. Здания и лестничные клетки (по [45, табл. 4] и [47, табл. 2]; ширина между поручнями и население – по архиву [46])

Здание (номер источника)	Этажей	Клетка – человек в модели	Ширина марша b: полная / между поручнями / эффективная, м	Ступень: подступёнок / проступь, мм; уклон	Ступеней на типовой этаж	Дверь выхода $b_{дв}$, м	Задержка входа в клетку, с [47]	Эксперимент: t95 / полное время, с [45, табл. 19]
10-этажное (5), Западное побережье, 2008	10	5A – 436; 5B – 371	1,27 / 1,22 / 0,97	178 / 279; 32,5°	22 (нижний пролёт 27)	0,91	171 ± 124	5A: 601 / 1026; 5B: 587 / 841
18-этажное (7), Восточное побережье, 2008	18	7-1 – 286; 7-3 – 312; 7-7 – 373; 7-12 – 197	1,12 / 0,91 / 0,81	191 / 254; 36,9°	16 (нижний 19)	0,83	224 ± 146	7-1: 707 / 1032; 7-3: 619 / 927; 7-7: 717 / 1193; 7-12: 517 / 612
24-этажное (4), Западное побережье, 2008	24	4A – 258; 4B – 363	1,12 / 1,02 / 0,81	178 / 279; 32,5°	20 (нижний 30; 4B выходит на 1-й этаж, 60)	0,91	137 ± 86	4A: 564 / 1339; 4B: 631 / 1091
31-этажное (8), Восточное побережье, 2008	31 (13-го этажа нет)	8N – 684; 8S – 532	1,38 / 1,26 / 1,07	178 / 273; 33,1°	18 (нижний 27)	0,91	149 ± 88	8N: 1043 / 1576; 8S: 922 / 1086

Эффективная ширина по [45] равна полной за вычетом пограничных слоёв по 150 мм. В модели марш имеет ширину между поручнями. Средние скорости по клеткам зданий (0,44 ± 0,19; 0,44 ± 0,15; 0,56 ± 0,12; 0,52 ± 0,10 м/с) даны в [47, табл. 3].

Величина для сравнения – замеренное время выхода 95 % населения каждой клетки [45, табл. 19]. Сравнение с натурным экспериментом относится к валидации, допуск документа ±20 %. Собственный критерий приёмки источника составляет ±17 % и относится к сходимости его расчётной схемы на той же величине [45, с. 115]. Здесь он приводится для сведения. Дополнительно сравниваются кривая «вышло(t)» с мерами ERD, EPC и SC по разделу 1.5 [43]. Сравниваются также плотность и скорость на марше и площадке среднего населённого этажа и поток через дверь выхода: средние 90 %, формула (8) [45].

Архив [46] содержит по каждому человеку этаж и момент входа в клетку, время выхода из здания, локальную скорость и плотность на площадке. Отсчётов «скорость–плотность» в нём 13 050. По каждой камере даны расстояние до выхода и эффективная площадь площадки. Вычисленное из архива полное время сходится с [45, табл. 19] во всех десяти клетках с точностью 1…2 с. Население клетки в модели равно числу вошедших по столбцу Floor Entered. Оно на 1…12 % отличается от [47], где учтены только люди с полным набором замеров. Пять величин источником не заданы. Планировка этажа и ход по нему до лестничной двери неизвестны, поэтому в модели помещение прямоугольной формы поставлено у самого проёма. Влияние допущения мало: замеренная задержка отсчитывается до входа в клетку и путь по этажу уже включает. Глубина промежуточной площадки принята равной ширине марша, отчего длина пути по площадке расходится с источником на 5 %. Ширина дверей с этажей в клетку принята равной ширине двери выхода, и от неё зависит порядок слияния поэтажных потоков. Момент, в который каждый

человек начинает движение, неизвестен: замерен только вход в клетку, поэтому время начала эвакуации назначено по замеренному поклеточно распределению задержки [45, табл. 18]. Площадь и габарит проекции человека приняты по профилю библиотеки [1, табл. П2.5], и от габарита зависит, до какой плотности они размещаются в расчёте. Основное ограничение опыта: камеры стояли на площадках, поэтому измеренная кривая марша построена против плотности на площадке, другой её меры в опыте нет. Каждое учение проведено по одному разу, и разброс замеров есть только между клетками и зданиями.

Г10.2 Расчётная модель и конфигурации расчёта

На каждую лестничную клетку построена своя модель: на каждом населённом этаже стоят помещение с людьми по замеренному поэтажному населению и дверь шириной $b_{дв}$. Между этажами идут два марша с промежуточной площадкой и поворотом на 180°. Ступени и ширина марша взяты по таблице зданий выше, глубина площадки равна его ширине. Внизу стоит дверь выхода. Время разгона 1,5 с, предел потока проёма 1,42 чел/(с·м). За время начала эвакуации принята задержка входа в клетку [45, табл. 18]: она своя для каждой клетки, одинакова в обеих конфигурациях и назначена стратифицированными квантилями.

Каждая клетка рассчитана в трёх расстановках: меняется начальное число генератора, от которого зависят размещение людей в помещениях этажей и то, какая задержка входа приходится на каждого из них. Само распределение задержек и поэтажное население сохраняются. Расчётов шестьдесят: десять клеток × две конфигурации × три расстановки. Отдельно рассчитаны три модели клетки 5А для кадров прохода площадки.

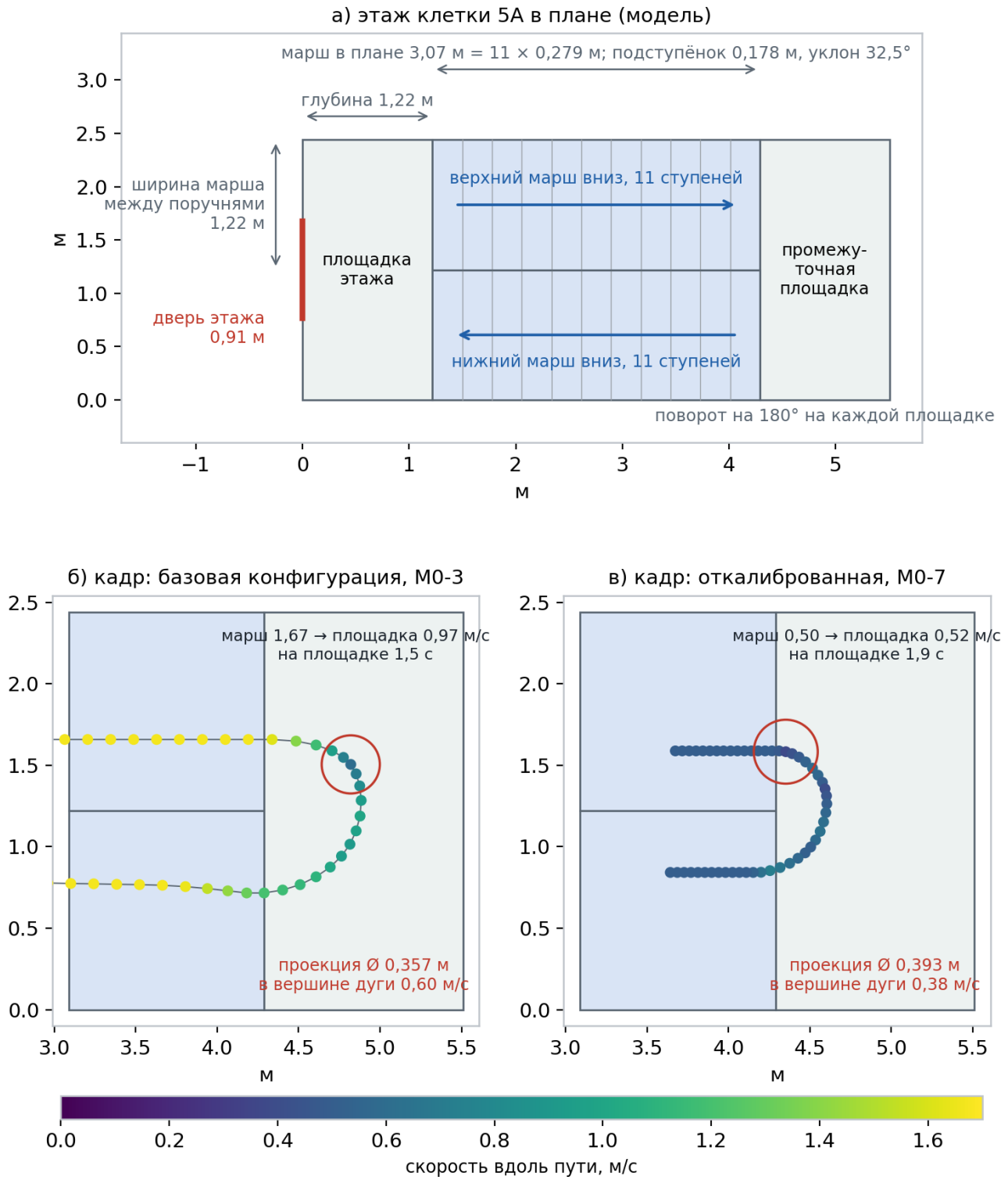


Рисунок 161. Модель лестничной клетки 5А: а) этаж в плане с размерами, б) и в) кадр расчёта, где один человек проходит промежуточную площадку, отсчёты через 0,1 с

Конфигурации различаются одним параметром: профилем группы мобильности. В **базовой конфигурации** принят М0-3 (летняя одежда), который [1, табл. П2.3] предписывает офисному зданию класса Ф4.3, с табличными параметрами [1, табл. П2.6]. Такой расчёт отвечает расчёту пожарного риска для офисного здания. В **откалиброванной конфигурации** взят профиль М0-7 с табличными параметрами. Замеренным на учениях скоростям 0,44…0,87 м/с по шкале [9, табл. 3.5] отвечает комфортное движение, и в эту категорию условий движения из библиотеки попадает только М0-7. Параметры профилей не изменялись.

Таблица 97. Конфигурации расчёта

Параметр	Базовая конфигурация	Откалиброванная конфигурация	Источник значения
профиль группы мобильности	M0-3 (летняя одежда): люди трудоспособного возраста 18–60 лет	M0-7: люди с грудными детьми, дети дошкольного и школьного возраста, трудоспособные, активные пожилые	[1, табл. П2.1]; параметры профилей не изменялись
основание выбора профиля	класс функциональной пожарной опасности Ф4.3 – офисные здания	измеренная в опыте категория условий движения – комфортная (скорости 0,44… 0,87 м/с)	[1, табл. П2.3]; [9, табл. 3.5]
горизонтальный путь (площадки): V_0, м/мин (м/с); a; D_0, чел/м²	100,0 (1,67); 0,295; 0,51	45,0 (0,75); 0,425; 0,86	[1, табл. П2.6]
лестница вниз: V_0 вдоль наклона, м/мин (м/с); a; D_0, чел/м²	100,0 (1,67); 0,40; 0,89	30,0 (0,50); 0,367; 0,62	[1, табл. П2.6]
категория условий движения по V_0 лестницы вниз	повышенной активности	комфортное движение	шкала – раздел 2.2, [9, табл. 3.5]
площадь проекции f (летняя одежда), м²; диаметр проекции, м	0,100; 0,357	0,121; 0,393	параметры профиля библиотеки [1, табл. П2.5, П2.6]
плотность расстановки, чел/м²	10	7,44	10 – значение по умолчанию расчёта; 7,44 – значение профиля M0-7 библиотеки
общее для обеих конфигураций	кривые «скорость–плотность» (П2.1) [1] по каждому виду пути; время разгона 1,5 с; предел потока проёма 1,42 чел/(с·м); задержка входа в клетку [45, табл. 18]; население по [46]	то же	не изменялось

Расчётная скорость схода с марша составляет 1,67 м/с при базовой конфигурации и 0,50 м/с при откалиброванной. В потоке она снижается до 0,52 и 0,38 м/с соответственно. Площадку человек проходит в среднем на 1,01 и 0,52 м/с за 1,5 и 1,9 с.

Г10.3 Результаты и анализ

Таблица 98. Десять клеток: время выхода 95 %, плотность на площадке, согласие кривых «вышло(t)»; время и меры согласия – среднее трёх расстановок

Клетка (здание)	Человек	Эксперимент t95, с	Базовая (M0-3): t95, с / Δ_t / в допуске ±20 %	Откалиброванная (M0-7): t95, с / Δ_t / в допуске ±20 %	Размах t95 по расстановкам, с: базовая / откалиброванная	Плотность на площадке, чел/м²: измеренная средняя (наибольшая) / базовая / откалиброванная	ERD / EPC / SC: базовая	ERD / EPC / SC: откалиброванная
5A (10)	436	601	436 / −27,5 % / нет	631 / +5,0 % / да	15 / 10	1,87 (3,79) / 0,67 / 1,23	0,19 / 0,90 / 0,85	0,09 / 1,04 / 0,95
5B (10)	371	587	377 / −35,8 % / нет	584 / −0,6 % / да	4 / 7	1,55 (3,25) / 0,67 / 1,45	0,28 / 0,83 / 0,82	0,08 / 1,02 / 0,96
7-1 (18)	286	707	495 / −30,0 % / нет	659 / −6,8 % / да	12 / 0	1,76 (3,74) / 1,21 / 1,21	0,34 / 0,82 / 0,66	0,04 / 0,98 / 0,95
7-3 (18)	312	619	371 / −40,1 % / нет	604 / −2,4 % / да	3 / 9	1,80 (3,72) / 1,21 / 1,81	0,32 / 0,82 / 0,70	0,04 / 0,99 / 0,95
7-7 (18)	373	717	544 / −24,1 % / нет	655 / −8,6 % / да	4 / 4	1,74 (3,68) / 1,21 / 1,21	0,21 / 0,88 / 0,83	0,05 / 0,98 / 0,91
7-12 (18)	197	517	421 / −18,6 % / да	513 / −0,8 % / да	15 / 16	1,28 (2,97) / 1,21 / 1,21	0,25 / 0,84 / 0,83	0,08 / 1,03 / 0,96
4A (24)	258	564	486 / −13,8 % / да	648 / +14,9 % / да	12 / 19	1,41 (3,90) / 0,96 / 0,96	0,20 / 0,91 / 0,70	0,06 / 1,02 / 0,95
4B (24)	363	631	357 / −43,4 % / нет	686 / +8,7 % / да	2 / 2	1,41 (2,71) / 0,96 / 0,96	0,26 / 0,86 / 0,74	0,10 / 1,05 / 0,93
8N (31)	684	1043	616 / −40,9 % / нет	1047 / +0,4 % / да	2 / 12	1,46 (3,09) / 0,94 / 0,94	0,32 / 0,82 / 0,70	0,03 / 1,00 / 0,97
8S (31)	532	922	490 / −46,9 % / нет	865 / −6,2 % / да	9 / 1	0,93 (2,90) / 0,94 / 1,14	0,37 / 0,77 / 0,71	0,06 / 0,98 / 0,86
Сводка	3 812		**−32,1 %** (модуль 32,1 %); **в допуске 2 из 10**	**+0,4 %** (модуль 5,4 %); **в допуске 10 из 10**	2…15 / 0…19	1,52 (3,38) / 0,96 / 1,21 (медианы)	0,27 / 0,84 / 0,76	0,06 / 1,01 / 0,94

Δ_t – отклонение среднего трёх расстановок от замера. Плотность в расчёте равна медиане отсчётов в области замера на площадке среднего населённого этажа, когда в ней находятся два человека и более. По прежнему критерию источника ±17 % базовая конфигурация укладывается в одной клетке из десяти,

в допуске документа ±20 % – в двух, 7-12 и 4A. Откалиброванная конфигурация по обоим критериям даёт десять клеток из десяти.

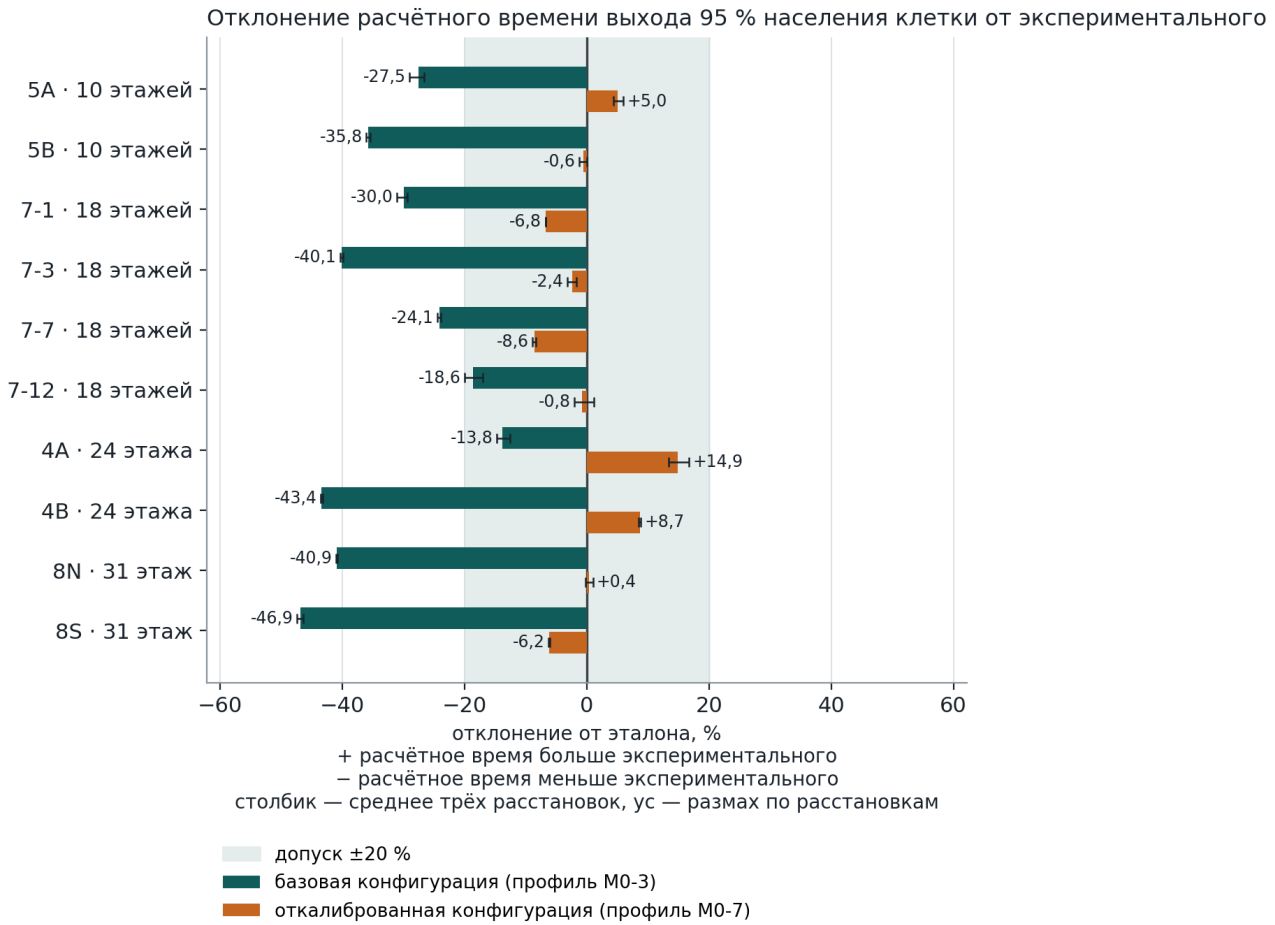


Рисунок 162. Отклонение времени выхода 95 % населения от замера по десяти лестничным клеткам: базовая конфигурация с профилем M0-3 и откалиброванная с M0-7. Столбик показывает среднее трёх расстановок, ус – размах по ним. Серым дана полоса допуска ±20 %, штриховыми линиями – критерий источника ±17 %

В базовой конфигурации с профилем M0-3 расчётное время выхода 95 % населения меньше экспериментального во всех десяти клетках, на 13,8…46,9 % и в среднем на 32,1 %. В допуске ±20 % две клетки. По лестничной составляющей это оценка снизу расчётного времени эвакуации. Скорость по клетке составляет 0,94…1,28 м/с против 0,22…0,44 м/с по архиву, больше на 221 %. Поток через дверь выхода выше замеренного на 58 %, на марше расчёт даёт 1,54 м/с при плотности 0,80 чел/м². Измеренные плотности на площадках в расчёте не набираются: при скорости профиля M0-3 люди расходятся прежде, чем такая плотность образуется. Профиль M0-3 задан для движения повышенной активности, а учебные эвакуации проходили при комфортном движении, и это различие разобрано ниже.

В откалиброванной конфигурации с профилем M0-7 все десять клеток укладываются в допуск ±20 % и в прежний критерий источника ±17 % в каждой из трёх расстановок. По зданиям отклонение составляет +2,2 / −4,6 / +11,8 / −2,9 % (10 / 18 / 24 / 31 этаж) при одном профиле с табличными параметрами. Скорость по клетке больше архивной на 7,5 %, поток через дверь выхода больше на 5,3 %, на марше расчёт даёт 0,30 м/с при плотности 2,46 чел/м² (измеренной кривой отвечает 0,31 м/с). Последние 5 % населения в опыте выходят с задержкой, которая в расчёте не воспроизводится: полное время эвакуации клетки на 0…32 % меньше замеренного (в среднем на 21 %). Величиной для сравнения поэтому взято время выхода 95 %.

Размах времени выхода 95 % составляет 0,3…3,7 % среднего при базовой конфигурации и 0,0…3,2 % при откалиброванной. Расхождение с экспериментом от четырёх до тридцати раз больше этого размаха. Знак отклонения при базовой конфигурации одинаков во всех трёх расстановках, а при откалиброванной все десять клеток остаются в допуске ±20 % в каждой из них.

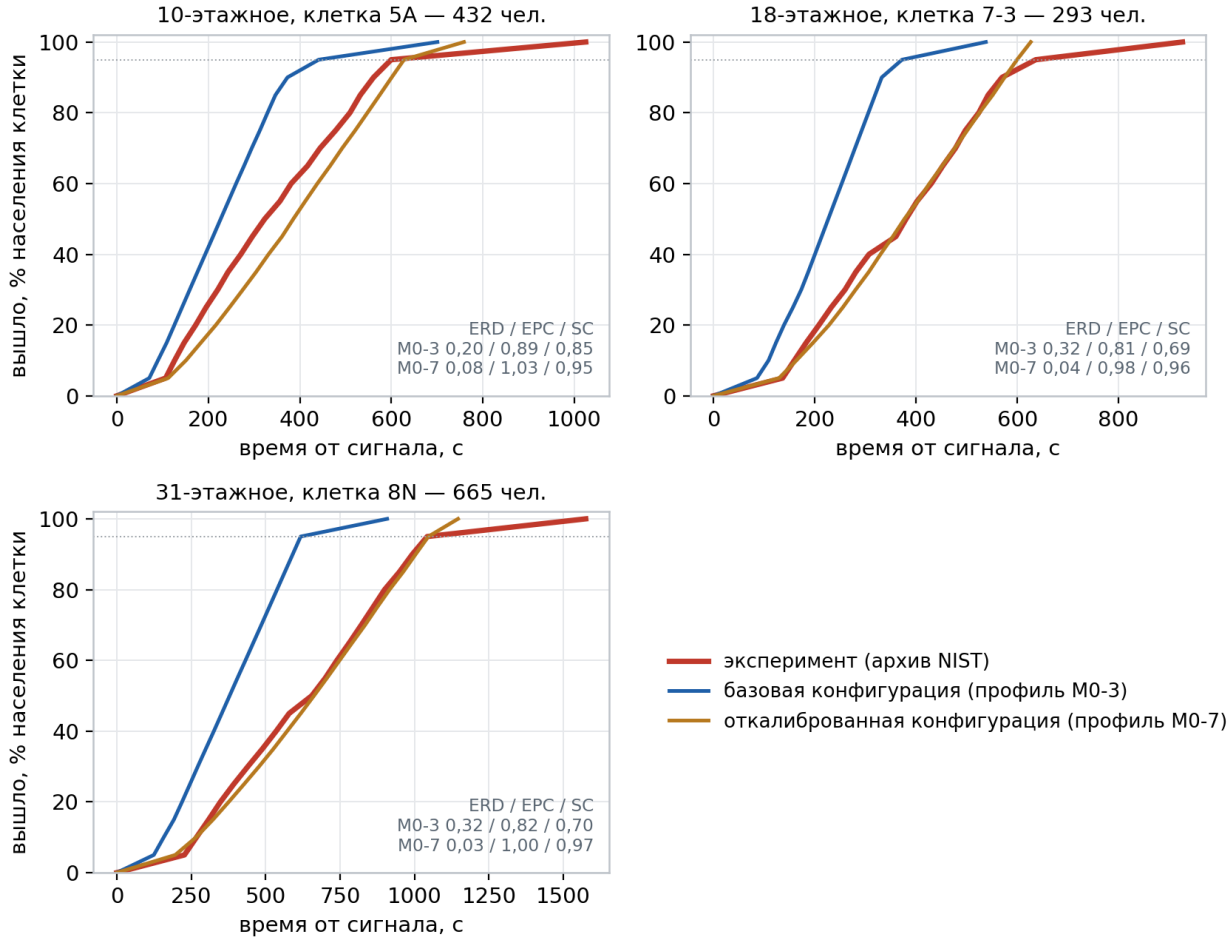


Рисунок 163. Доля вышедших от времени: эксперимент по архиву [46], базовая конфигурация с профилем M0-3 и откалиброванная с M0-7. Кривые расчёта дают среднее трёх расстановок, полоса – размах по ним. Лестничные клетки 5A, 7-3 и 8N, в углу ERD / EPC / SC

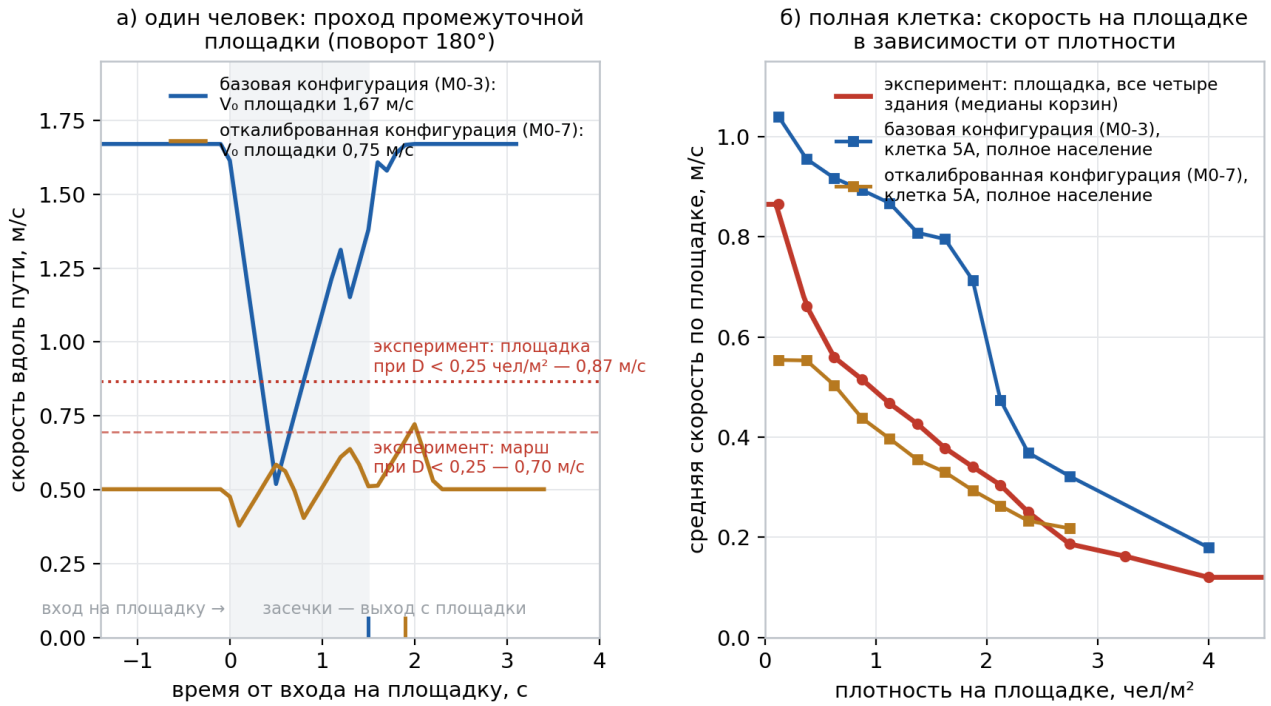


Рисунок 164. Промежуточная площадка: а) скорости одного человека вдоль пути при повороте на 180°, шаг 0,1 с, б) средняя скорость по площадке против плотности – эксперимент, базовая конфигурация с профилем M0-3 и откалиброванная с M0-7

Медианы построены по корзинам плотности шириной 0,25 чел/м². При 0,75…3 чел/м² расчётная скорость при базовой конфигурации составляет 0,80…0,89 против измеренных 0,34…0,47 м/с, выше в 1,9…2,3 раза. При откалиброванной она отличается от измеренной кривой по модулю не более чем на 17 %. При малой плотности расчётная скорость на площадке при базовой конфигурации выше измеренной, 1,01…1,04 против 0,87 м/с, а при откалиброванной ниже, 0,52…0,55 м/с.

V_0 формулы (П2.1) – среднее значение скорости свободного движения людей в потоке при $D \leqslant D_0$. Для M0-3 на лестнице вниз это 100 м/мин = 1,667 м/с вдоль наклона [1, табл. П2.6; прил. 5, п. 10]. По шкале категорий условий движения (раздел 2.2) такая скорость отвечает движению повышенной активности. На учениях медиана скорости на марше при малой плотности (D < 0,25 чел/м², 727 отсчётов) составляет 0,70 м/с = 42 м/мин, у шедших без соседей 0,86 м/с, а 0,87 м/с замерены на площадке. По той же шкале это комфортное и спокойное движение. От V_0 методики измеренная скорость при малой плотности отличается в 1,9…2,4 раза. По наибольшей интенсивности движения по маршу отличие достигает 3,5 раза: 16,0 против замеренных 4,55 м/мин, или 0,76 чел/(с·м) при размахе 0,64…0,92. Форма зависимости не меняется: нормированный наклон 0,21…0,31 на чел/м² при 0,266 у гидравлической модели [36].

Категория условий движения задана в методике уровнем V_0 каждой группы мобильности, отдельного параметра для неё нет, поэтому профиль выбирается по контингенту и по категории одновременно. По V_0 лестницы вниз [1, табл. П2.6] профили библиотеки располагаются так (м/мин): M0-2 129, M0-3 100, M0-4 93,8, M0-1 92,4, M0-5 90,0, M0-6 61,7, M0-7 30,0. В комфортную категорию, измеренную на учениях, попадает только M0-7. По [1, табл. П2.1, П2.3] M0-7 – контингент жилых домов, а не офисов: он выбран по категории условий движения, а не по составу людей. Профиль внутри одной категории влияет на результат через форму кривой «скорость–плотность» и площадь проекции, а не только через V_0. У M0-7 коэффициент a = 0,367 и порог D_0 = 0,62 чел/м² против 0,40 и 0,89 у M0-3, а проекция занимает 0,121 м² вместо 0,100 м².

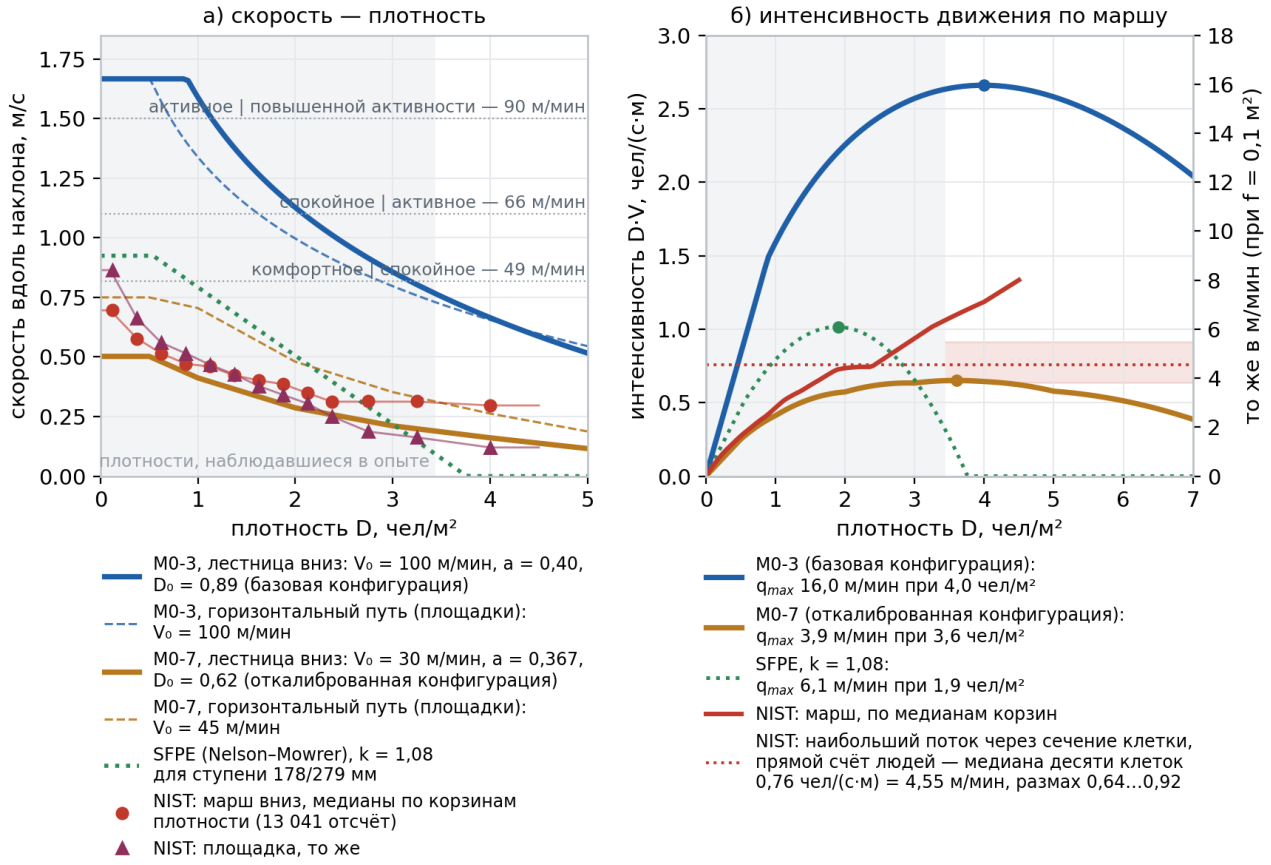


Рисунок 165. Профили M0-3 и M0-7 в сравнении с экспериментальными данными: а) скорость вдоль наклона против плотности, кривая гидравлической модели [36], б) интенсивность D·V по маршу

Крутизна лестниц 32,5…36,9° против типовой российской ступени 150/300 мм (26,6°): по [49] горизонтальная составляющая свободного спуска уменьшается с 0,87 до 0,59 м/с на уклонах 24,6…38,8°. Пересчёт измеренной скорости на уклон 26,6° приводит к значению около 0,92 м/с вдоль наклона, в 1,8 раза ниже 1,667 м/с. На крутизну приходится не более четверти расхождения. Контингент офисов США (смешанный возраст, любая обувь и одежда, ноша, движение с опорой на поручни) – часть того же различия в обстановке. Отдельного параметра поворота нет ни у модели, ни у методики (раздел 2.4). Скорость на площадке при базовой конфигурации близка к измеренной, поэтому расхождение в 2,4 раза относится к маршам.

При плотной очереди на марше упаковка проекций доходит до 7,4 чел/м² при наибольшей замеренной в опыте 3,2 чел/м². Из клетки выходят все люди во всех шестидесяти расчётах: при плотной очереди на марше расчёт проверяется на полноту выхода населения, а не только на величину времени.

Скорость на марше при малой плотности не воспроизводится: V_0 профиля M0-7 на лестнице вниз равна 0,50 м/с против 0,70 м/с, измеренных на учениях. Согласование по времени выхода достигается при заниженной скорости свободного движения. Знак отклонения при откалиброванной конфигурации непостоянен: по клеткам −8,6…+14,9 %. Разброс между клетками внутри одного расчёта на порядок превышает размах по расстановкам (0,0…3,7 %). С параметрами лестниц и с поэтажным населением он не связан. Неизвестными остаются планировки этажей, ширина дверей в клетку с каждого из них и вместе с нею последовательность, в которой поэтажные потоки сливаются на площадках.

Г10.4 Выводы

В базовой конфигурации принят профиль М0-3, предписанный офисному зданию класса Ф4.3 [1, табл. П2.3]. Расчётное время выхода основной части населения меньше экспериментального во всех лестничных клетках, в допуске единичные клетки, и по лестничной составляющей расчёт даёт оценку снизу для зданий такой высоты и такого контингента. Причина расхождения – категория условий движения: скорость профиля М0-3 на лестнице вниз отвечает повышенной активности, а на учебных эвакуациях замерено комфортное движение. При откалиброванной конфигурации заменён один параметр: принят профиль М0-7 с табличными параметрами [1, табл. П2.6], единственный в библиотеке, чья скорость свободного движения на лестнице вниз попадает в комфортную категорию по шкале [9, табл. 3.5]. В допуске все клетки всех четырёх зданий. Разброс по расстановкам на порядок меньше разброса между клетками, поэтому расхождение между ними начальным размещением людей не объясняется.

Ограничение применения: профиль М0-7 отвечает обстановке учебной эвакуации, комфортному и спокойному движению служащих по американским лестницам. Методикой он предписан жилым домам, а не офисам, и на расчёт пожарного риска не переносится: там профиль назначается по [1, табл. П2.3]. Слияние поэтажных потоков в лестничной клетке отдельно не проверено: ширины дверей с этажей в опыте не замерены и приняты равными ширине двери выхода. Порядок слияния задан допущением модели, и разброс отклонений между клетками внутри одного расчёта может относиться к нему.

Приложение Г11. Российские натурные опыты по проёму: Милинский, Копылов, Предтеченский–Тарасова

Г11.1 Источник и данные

Дверной проём ограничивает пропускную способность пути эвакуации, и отечественная нормативная база построена на измерениях удельного потока через створ, выполненных в 1951–1974 гг. Приложение сопоставляет расчёт с этими измерениями: проверяется, сколько людей в секунду проходит через створ заданной ширины в расчёте и в действительности. Опытов четыре, точек пятнадцать. Измерялась одна величина: наибольший удельный поток через створ и плотность людского потока перед ним, и сравнение ведётся с наибольшим потоком серии.

Все четыре ряда опубликованы: наблюдения **А. И. Милинского** [18;7], наблюдения в универмаге и метрополитене и эксперимент в трансформируемом манеже **В. А. Копылова** [19;24;12, с. 28–31] и наблюдение **В. М. Предтеченского и Т. А. Тарасовой**[23]. Ряды всех четырёх сведены в приложении 1 монографии [11].

Таблица 99. Четыре российских опыта по проёму

Опыт	Вид	Контингент, площадь проекции f	Ширины проёма b, м	Что измерено	Где опубликовано
Милинский, 1951	наблюдение	смешанный, f = 0,100 м²	0,7 · 0,8 · 1,2 · 1,4 · 1,8 · 2,0	наибольший удельный поток 1,68…1,88 чел/(с·м) при D = 7…8 чел/м²	[11, прил. 1, с. 172–180]; [7]
Копылов, 1974	наблюдение: универмаг, метрополитен	смешанный, f = 0,125 м²	0,8 · 1,8 · 2,5	1,59…1,88 чел/(с·м) при D = 5…7 чел/м²	[11, прил. 1, с. 180–182]; [19]
Копылов, 1972–73	**эксперимент**, трансформируемый манеж, аварийные условия	**юноши, f = 0,080 м²**	0,8 · 1,2 · 1,4 · 1,6	**3,22…3,75 чел/(с·м)** при D = 8…9 чел/м²	[11, прил. 1, с. 182]; [12, с. 28–31]
Тарасова	наблюдение, метрополитен	смешанный, f = 0,150 м²	0,95	2,20 чел/(с·м) при D = 9 чел/м²	[11, прил. 1, с. 182]; [23]

Эталон – наибольший удельный поток серии. Численного допуска источники не назначают. Опыты относятся к валидации, и вывод «в допуске» делается по допуску документа ±20 %.

Пятый российский ряд по проёму, выход из вагона метрополитена, и обобщённые ряды «скорость–плотность» по контингентам в приложение не входят как невоспроизводимые.

Подробнее всех описан манеж Копылова: 14 дощатых щитов, перестановка которых позволяла получать ширины проходов и проёмов 0,8…3,0 м с шагом 0,2 м. Потоки формировались слушателями пожарно-технической школы и служащими пожарных частей. Замеры велись визуально у сечений А–А, В–В, С–С и кинофотосъёмкой. Три других опыта – наблюдения у действующих проёмов зданий: движение людей в обычных условиях, а не при эвакуации.

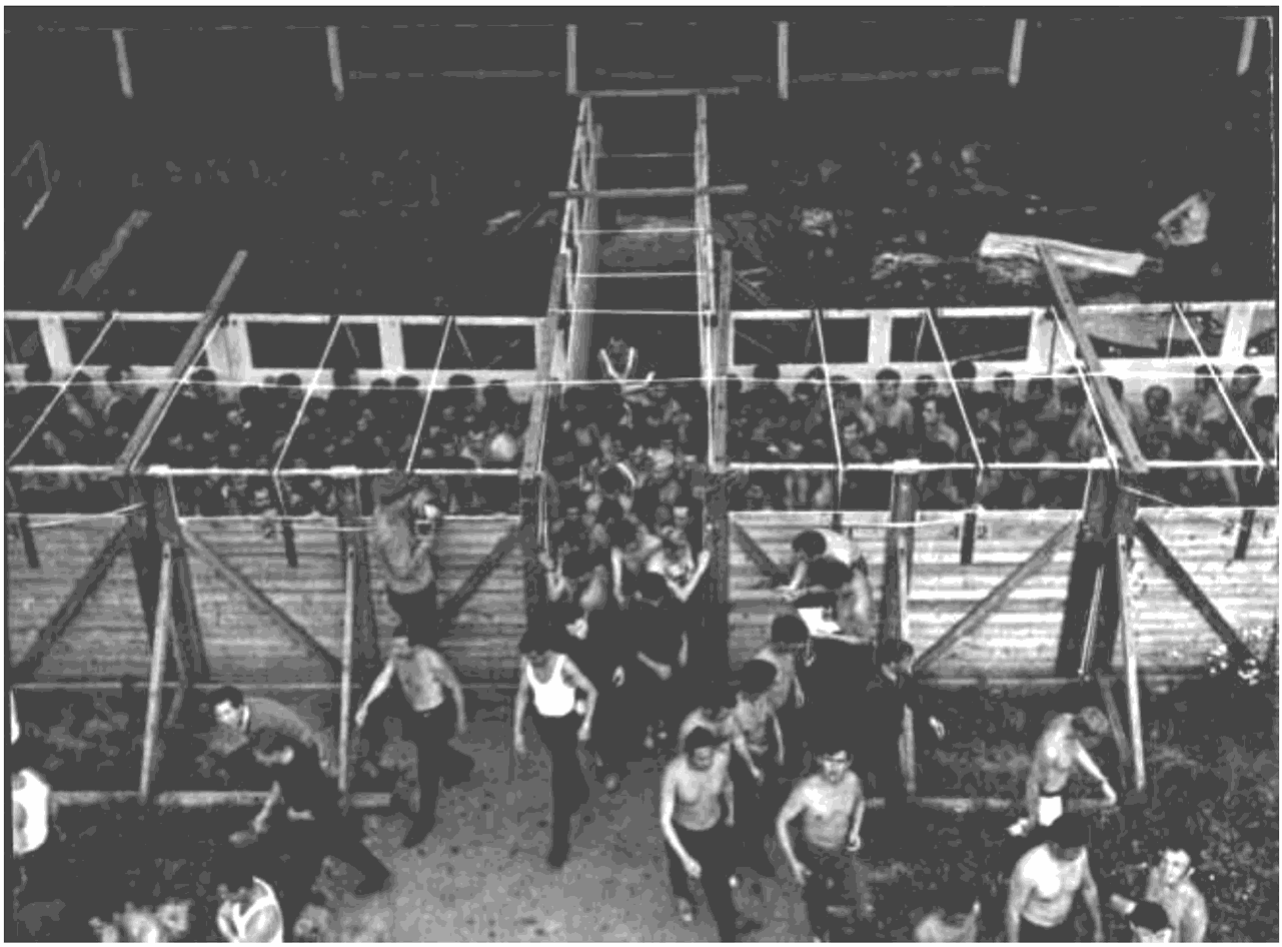


Рис. 2.4. Трансформируемый манеж для проведения экспериментов

Рисунок 166. Трансформируемый манеж В. А. Копылова: фотография опыта (по [12], рис. 2.4)

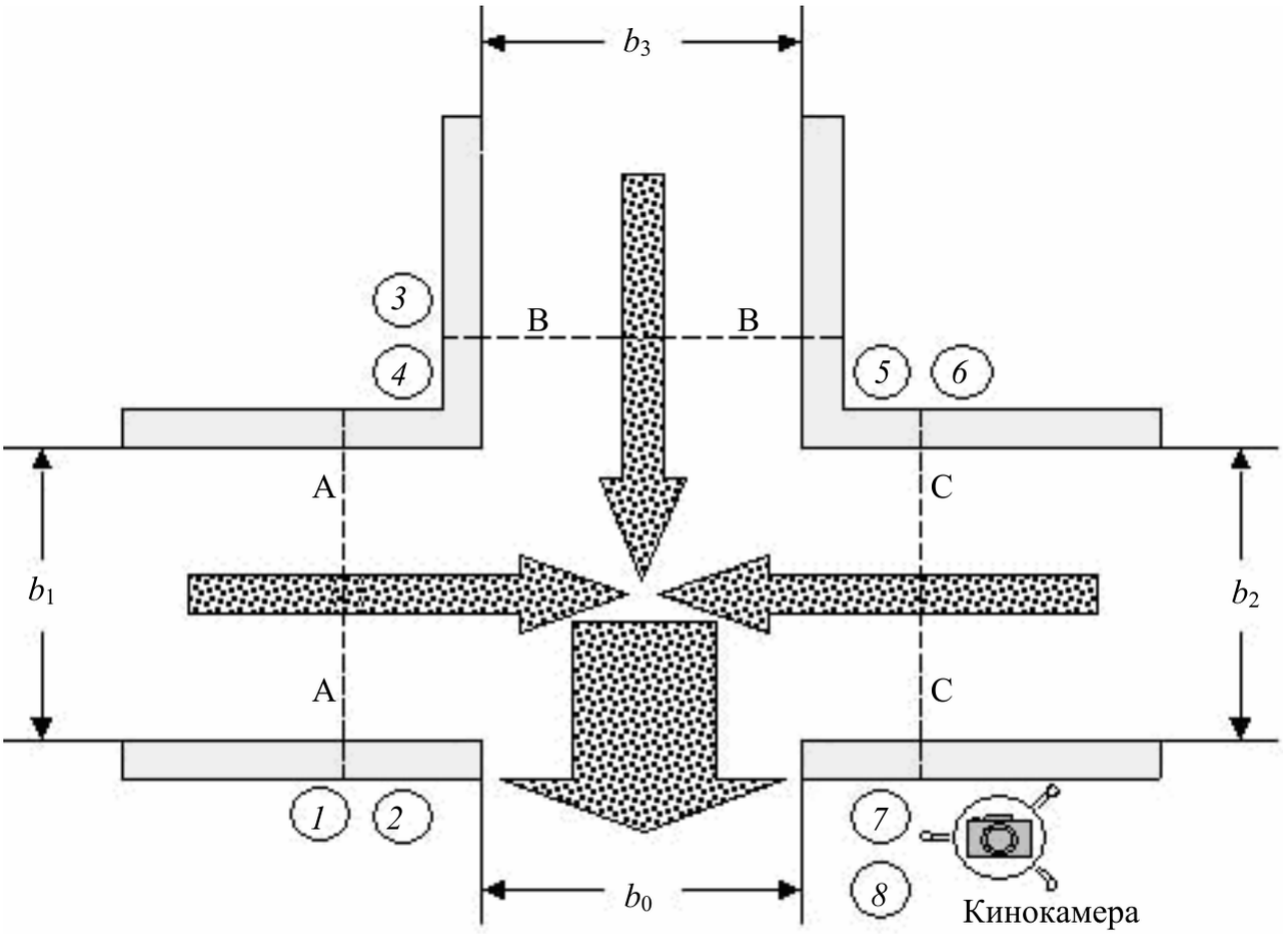


Рис. 2.5. Схема расстановки наблюдателей и кинофотоаппаратуры при проведении эксперимента на манеже:
1, *3*, *5*, *7* – места расположения хронометристов;
2, *4*, *6*, *8* – места расположения счётчиков;
A–A, B–B, C–C – контрольные сечения пути

Рисунок 167. План манежа с расстановкой хронометристов и счётчиков, контрольные сечения A–A, B–B, C–C и ширины b_0... b_3 (по [12], рис. 2.5)

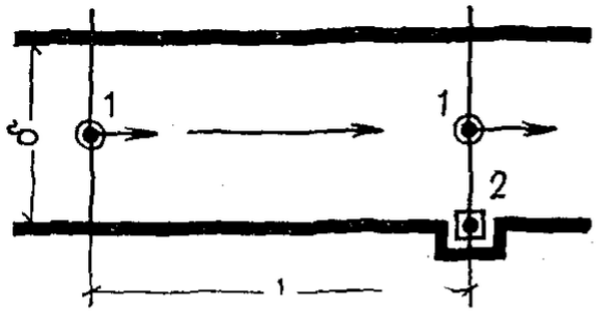


Рис. 3.6. Схема визуальных натурных наблюдений за движением людских потоков

1 — «заметный» человек; *2* — наблюдатель

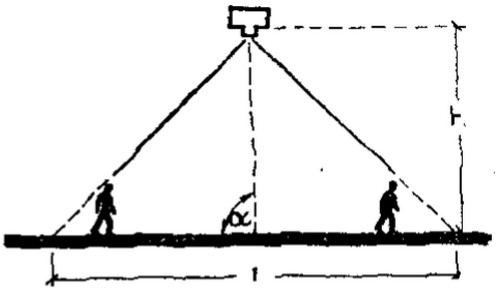


Рис. 3.7. Схема натурных наблюдений при помощи фото- или киносъемки

α — угол наклона оптической оси съемочного аппарата к горизонту; *H* — высота установки съемочного аппарата

Рисунок 168. Схемы наблюдения у проёма: визуальная и при помощи фото- и киносъёмки (по [7], рис. 3.6 и 3.7)

Опыты измеряли поток через створ, а не эвакуацию из конкретного помещения, поэтому помещение, число людей и их начальное размещение источниками не заданы.

Таблица 100. Что содержат данные четырёх опытов и чего в них нет

Что требуется	Милинский	Копылов, наблюдение	Копылов, манеж	Тарасова
ширина проёма b	есть по каждой серии	есть	есть	есть
площадь проекции контингента f	0,100 м²	0,125 м²	0,080 м²	0,150 м²
плотность, при которой измерен поток	D = 7…8 чел/м²	D = 5…7	D = 8…9	D = 9
число замеров	есть по каждой точке	есть	есть	есть
разброс (дисперсия)	нет	нет	нет	нет
геометрия помещения, число человек, расстановка	**нет – заданы при построении модели**	**нет**	схемы есть, число участников нет	**нет**
оценка полноты	**достаточно с допущениями**	**то же**	**то же**	**достаточно, но одна точка**

Сопоставляемая величина, удельный поток в установившейся фазе, от помещения и числа людей не зависит, но проверить это по источнику нельзя. Разброс замеров не публиковался, поэтому отнести расхождение к погрешности эксперимента не удаётся.

Г11.2 Расчётная модель и конфигурации расчёта

Постановка расчёта одна на все четыре опыта и та же, что в приложении Г2. Комната 8 × 5 м, проём ширины b в стене 5 м, 200 человек равномерной шестиугольной расстановкой без случайности при плотности расстановки 5 чел/м². Удельный поток измеряется в установившейся фазе, между 15 и 85 % вышедших. Сверх того, что задано источником, назначается только профиль. Разброса по начальному числу расстановки здесь нет: расстановка одна. Всего 180 расчётов: девять профилей библиотеки на девяти ширинах 0,7…2,5 м при пределе 1,42 чел/(с·м) и без ограничения потока проёма, это 162 расчёта. Ещё 18 отведено двум профилям М0-3 при пределе 1,796 чел/(с·м).

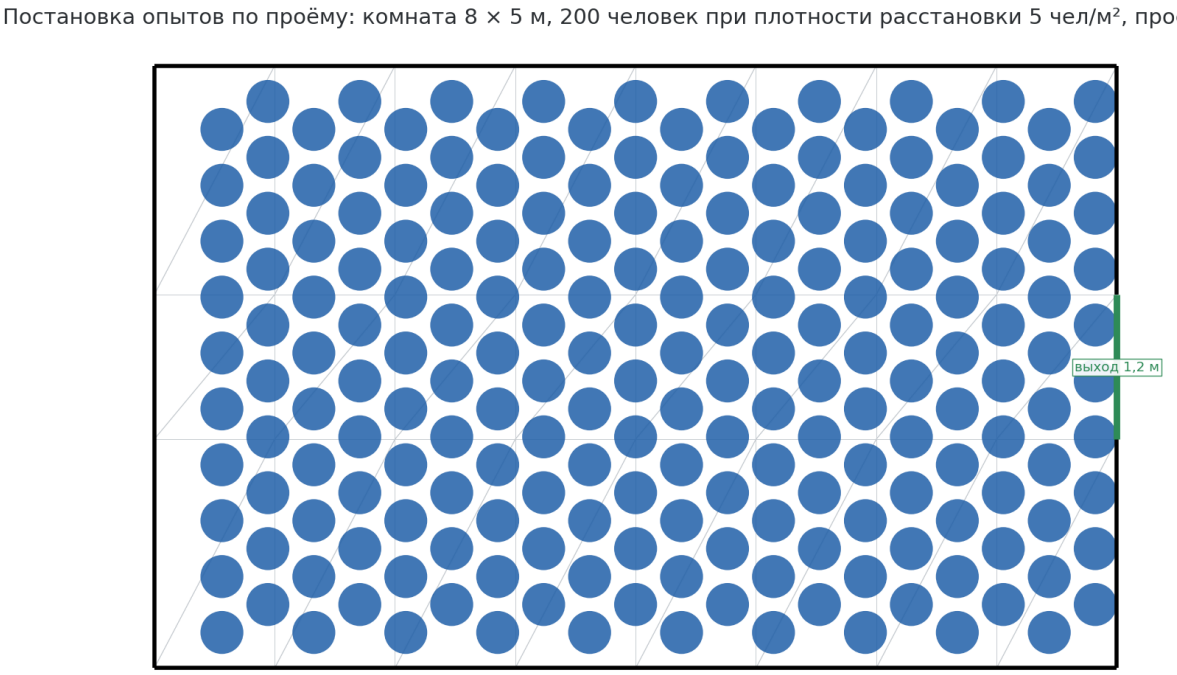


Рисунок 169. План модели: комната 8 × 5 м, проём ширины b в стене 5 м, 200 человек равномерной шестиугольной расстановкой при плотности расстановки 5 чел/м². Показана ширина 1,2 м

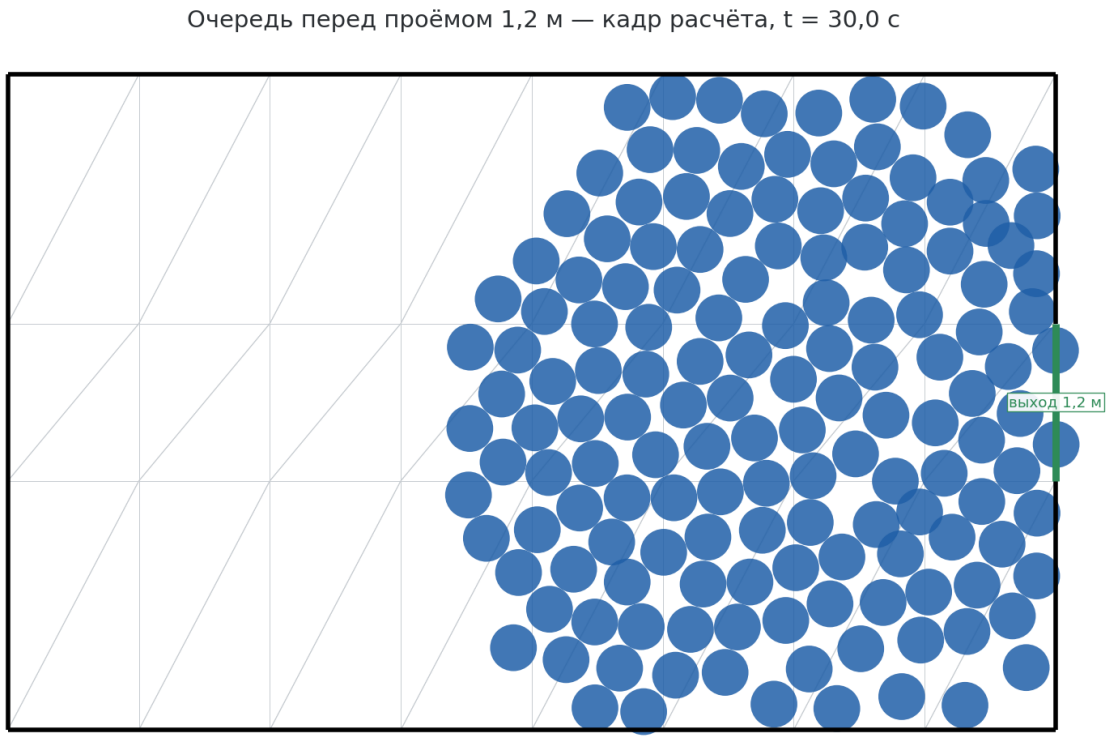


Рисунок 170. Кадр расчёта на 30-й секунде: скопление перед проёмом 1,2 м, через который измеряется удельный поток

Три наблюдения сняты у действующих проёмов, класса здания источники не называют, поэтому группа мобильности назначена по контингенту опыта: смешанному потоку отвечает М0-3. Назначение по классу здания (универмаг Ф3.1, метрополитен Ф3.3) отвечало бы по табл. П2.3 [1] профилю М0-5. Расчёт с ним не выполнялся, и это ограничение сопоставления по трём наблюдениям. Манеж Копылова – установка

учебного заведения пожарно-технического профиля. По табл. П2.3 [1] профилю М0-3 отвечают строки Ф4.2, образовательные организации высшего образования и ДПО, и Ф4.4, здания пожарных депо. Для манежа базовой конфигурацией принят профиль М0-3 в летней одежде.

В откалиброванной конфигурации профиль манежа назначен по контингенту опыта. Контингент назван в источнике прямо: юноши 18–25 лет с площадью проекции 0,080 м². В библиотеке методики им отвечает профиль М0-2 «молодёжь 18–25 лет» (V_0 = 2,0 м/с, диаметр проекции 0,3385 м, f = 0,090 м²), взятый с табличными параметрами. В трёх наблюдениях контингент смешанный, профилю М0-3 отвечает, и в откалиброванной конфигурации профиль не изменяется.

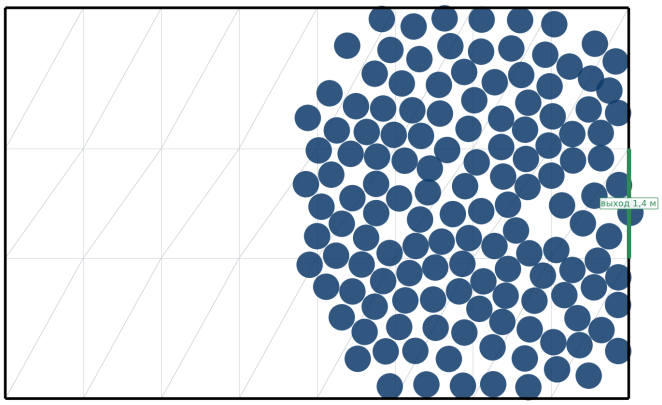
Таблица 101. Конфигурации расчёта приложения Г11

Параметр	Базовая конфигурация	Откалиброванная конфигурация	Источник значения
профиль группы мобильности, три наблюдения	М0-3 по контингенту опыта (смешанный поток): летняя одежда у Милинского, зимняя у Копылова и Тарасовой	тот же профиль М0-3, параметры не изменялись	контингент и площадь проекции – сам опыт [11, прил. 1]; числа профиля – [1, табл. П2.5, П2.6]
профиль группы мобильности, манеж Копылова	М0-3 по классу здания (Ф4.2 либо Ф4.4 [1, табл. П2.3]), летняя одежда	**М0-2 «молодёжь 18–25 лет»** [1, табл. П2.1], летняя одежда, параметры табличные	фактический контингент опыта – юноши 18–25 лет [11, прил. 1;12, с. 28–31]; параметры профиля – [1, табл. П2.6]
предел потока проёма, Милинский	1,42 чел/(с·м) [1, табл. П2.8]	**1,796 чел/(с·м)** – средний наибольший удельный поток шести серий наблюдений самого Милинского у проёмов зданий массового назначения	[11, прил. 1, с. 172–180]; **в методике числа нет**
предел потока проёма, Копылов, наблюдение	1,42 чел/(с·м)	**1,796 чел/(с·м)**: собственного замера ёмкости створа у этих серий нет, поэтому применено без изменения значение, измеренное в наблюдениях Милинского	то же; **в методике числа нет**
предел потока проёма, Копылов, манеж	1,42 чел/(с·м)	**не задан**	ёмкость створов измерена в этом опыте: 3,22…3,75 чел/(с·м), выше любого значения табл. П2.8 [1]
предел потока проёма, Тарасова	1,42 чел/(с·м)	**не задан**	ёмкость створа измерена в этом опыте: 2,20 чел/(с·м), выше 1,42
режим УАМ	выключен: предел задан значением	выключен: предел задан другим значением (два опыта) либо не задан (два опыта)	устройство переключателя – раздел 2.6
геометрия, число человек, расстановка	комната 8 × 5 м, 200 человек, плотность расстановки 5 чел/м², одна расстановка	то же	в источниках их нет (Г11.1); приняты одинаковыми в обеих конфигурациях
кривая «скорость–плотность» и проекция	значения профиля своей группы [1, табл. П2.6, П2.5]	то же	в откалиброванной конфигурации изменяется группа профиля в манеже, но не значения внутри неё

Откалиброванная конфигурация отличается от базовой значением предела потока проёма во всех четырёх опытах и, сверх того, группой профиля в манеже Копылова, где контингент назван источником

прямо. В манеже и у Тарасовой предел не задан. Измеренные там потоки 3,22…3,75 и 2,20 чел/(с·м) выше предела 1,42 и любого значения табл. П2.8 [1]. Пропускную способность створа в расчёте определяет модель движения.

Манеж Копылова, проём 1,4 м: откалиброванная конфигурация — профиль М0-2 (летняя одежда) библиотеки, без ограничения потока проёма — кадр расчёта, t = 12,0 с



Кадр расчёта копией сборки ядра. Расчётный удельный поток в этой конфигурации 3,73 чел/(с·м) при измеренном 3,75.

Рисунок 171. Кадр расчёта: манеж Копылова, проём 1,4 м, откалиброванная конфигурация – профиль М0-2 (летняя одежда) без ограничения потока проёма

Г11.3 Результаты и анализ

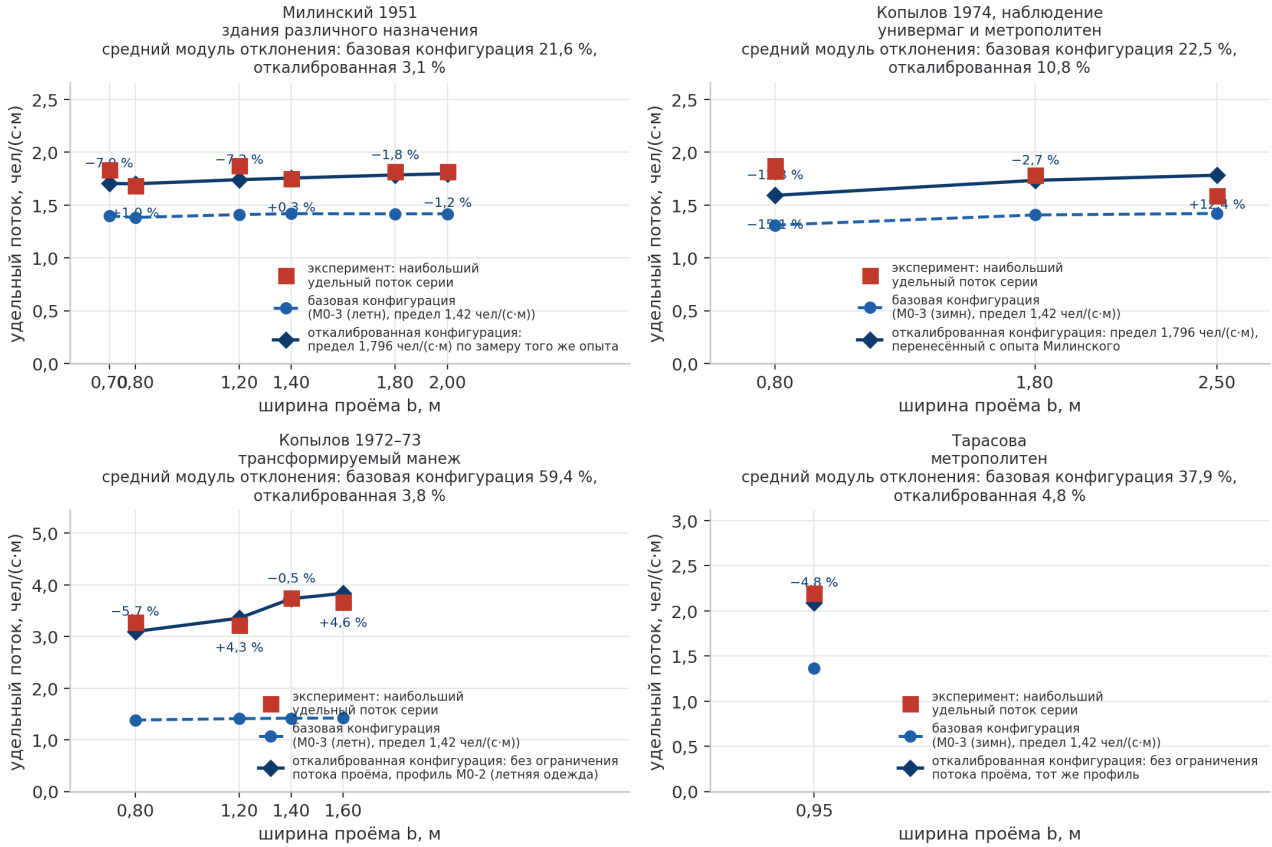
Таблица 102. Удельный поток через проём, чел/(с·м): экспериментальные значения и расчёт в двух конфигурациях

Опыт	b, м	Эксперимент	Базовая конфигурация	Δ	В допуске ±20 %	Откалиброванная конфигурация	Δ	В допуске ±20 %
Милинский	0,7	1,833	1,396	−23,8 %	нет	1,704	−7,0 %	да
Милинский	0,8	1,683	1,382	−17,9 %	да	1,700	+1,0 %	да
Милинский	1,2	1,875	1,409	−24,9 %	нет	1,740	−7,2 %	да
Милинский	1,4	1,750	1,418	−19,0 %	да	1,755	+0,3 %	да
Милинский	1,8	1,817	1,416	−22,1 %	нет	1,784	−1,8 %	да
Милинский	2,0	1,817	1,417	−22,0 %	нет	1,796	−1,2 %	да
Копылов, метрополитен	0,8	1,875	1,310	−30,1 %	нет	1,591	−15,1 %	да
Копылов, универмаг	0,8	1,825	1,310	−28,2 %	нет	1,591	−12,8 %	да
Копылов, универмаг	1,8	1,782	1,406	−21,1 %	нет	1,733	−2,7 %	да
Копылов, метрополитен	2,5	1,585	1,420	−10,4 %	да	1,782	+12,4 %	да
Копылов, манеж	0,8	3,282	1,382	−57,9 %	нет	3,096	−5,7 %	да
Копылов, манеж	1,2	3,216	1,409	−56,2 %	нет	3,355	+4,3 %	да
Копылов, манеж	1,4	3,751	1,418	−62,2 %	нет	3,732	−0,5 %	да
Копылов, манеж	1,6	3,667	1,420	−61,3 %	нет	3,836	+4,6 %	да
Тарасова	0,95	2,195	1,363	−37,9 %	нет	2,090	−4,8 %	да

В базовой конфигурации в допуск ±20 % попадают 3 точки из 15 (−19,0…−10,4 %). В остальных двенадцати расчётный удельный поток меньше измеренного на 21,1…62,2 %, и расчётное время прохода проёма больше действительного. Откалиброванная конфигурация укладывается в допуск во всех 15 точках (−15,1…+12,4 %), средний модуль отклонения по ним уменьшается с 33,0 до 5,4 %. Наибольшее отклонение вверх даёт наблюдение Копылова в метрополитене при b = 2,5 м (+12,4 %): расчётный поток больше измеренного, и расчётное время прохода меньше.

Таблица 103. Сводка по четырём опытам

Опыт	Точек	Базовая конфигурация, средний модуль Δ	Откалиброванная конфигурация, средний модуль Δ	Что изменено в откалиброванной конфигурации
Милинский, 1951	6	21,6 %	**3,1 %**	предел 1,796 чел/(с·м) по его же сериям
Копылов, наблюдение	4	22,5 %	**10,8 %**	тот же предел 1,796 чел/(с·м), измеренный у Милинского
Копылов, манеж	4	59,4 %	**3,8 %**	профиль M0-2 по фактическому контингенту, предел не задан
Тарасова	1	37,9 %	**4,8 %**	предел не задан



Эксперимент: Самошин «Состав людских потоков…» (2016), приложение 1 — Милинский (с. 172–180), Копылов (с. 180–182), Тарасова (с. 182); q_max серии — наибольшее значение V·D/60 по её точкам. Расчёт: комната 8 × 5 м, плотность расстановки 5 чел/м², проём ширины b, замер в установившейся фазе.

Рисунок 172. Четыре опыта по проёму: удельный поток через створ по ширине створа. Ряды: экспериментальные значения, базовая конфигурация с профилем по контингенту или классу здания и пределом 1,42 чел/(с·м), откалиброванная. У Милинского и в наблюдениях Копылова предел 1,796 чел/(с·м), в манеже профиль M0-2 без ограничения потока проёма, у Тарасовой поток не ограничен

При действующем пределе расчётный удельный поток составляет 1,31…1,42 чел/(с·м) независимо от ширины проёма и остаётся в этих границах при смене профиля. Его задаёт предел, а не геометрия створа и не состав людей. При снятом пределе поток определяют диаметр проекции и скорость свободного движения V_0, поэтому выбор профиля внутри группы M0 становится определяющим. На постановке манежа средний модуль отклонения по девяти профилям библиотеки, применённым без изменения параметров, изменяется от 3,8 % (M0-2, летняя одежда) до 62,3 %. У M0-3 он равен 19,4 %. Происхождение значения 1,42 чел/(с·м) описано в разделе 2.6.

Наблюдения сняты при обычном движении, 1,59…2,20 чел/(с·м). Эксперимент в манеже проходил в аварийных условиях и с иным контингентом, 3,22…3,75 чел/(с·м). Предел 1,42 чел/(с·м) ниже обоих: в базовой конфигурации отклонение составляет −37,9…−10,4 % от наблюдений и −62,2…−56,2 % от манежа. Предел 1,796 чел/(с·м), измеренный у Милинского и применённый без изменения к наблюдениям Копылова, уменьшает там средний модуль отклонения с 22,5 до 10,8 %. Площадь проекции у наблюдений Копылова зимняя, 0,125 м², у Милинского летняя, 0,100 м², при одном контингенте. Различие средних модулей при одном пределе, 3,1 и 10,8 %, идёт отсюда. При летнем профиле М0-3, как у Милинского, средний модуль наблюдений Копылова составил бы 7,4 %, но принят профиль по площади проекции самого источника. Эксперимент в манеже воспроизводится профилем фактического контингента, а не изменением предела: у М0-2 с табличными параметрами средний модуль отклонения по четырём ширинам равен 3,8 % против 19,4 % у М0-3 в той же конфигурации.

Немонотонный ход измеренного потока по ширине проёма не воспроизводится. У Копылова наибольшее значение на 2,5 м равно 1,585 чел/(с·м) и ниже, чем 1,782 на 1,8 м в той же серии. Расчётный поток с ростом ширины увеличивается монотонно, и ни один профиль библиотеки такого хода не даёт. Разброса замеров в источниках нет, поэтому проверить, укладывается ли расхождение в погрешность эксперимента, нельзя. Наблюдение Тарасовой – одна точка, и по ней вывод о ходе зависимости не делается.

Г11.4 Выводы

В базовой конфигурации расчётный удельный поток через створ почти не зависит от ширины проёма и меньше измеренного во всех точках четырёх опытов, в допуске единичные точки. Меньший расчётный поток отвечает большему расчётному времени прохода проёма: базовая конфигурация даёт оценку сверху на всех опытах.

В откалиброванной конфигурации изменены предел потока проёма и, в манеже Копылова, группа профиля. Предел взят по ёмкости, измеренной в самих наблюдениях Милинского, и применён без изменения к сериям Копылова, у которых собственного замера нет; в манеже и у Тарасовой ёмкость створа измерена и выше любого значения табл. П2.8 [1], поэтому предел там не задан. В манеже принят профиль М0-2 по фактическому контингенту опыта, юношам, с табличными параметрами. В допуск входят все точки: модель воспроизводит измеренную пропускную способность проёмов испытанного ряда ширин как при обычном движении, так и в аварийных условиях.

Приложение Г12. Маломобильные группы: скорости, интенсивность через проём, кресло-коляска

Г12.1 Источник и данные

Человек с ограниченной подвижностью идёт медленнее здорового взрослого и занимает на плане большую площадь, а кресло-коляска и дополнительные опоры меняют и скорость, и габарит проекции. В домах-интернатах, больницах и поликлиниках доля таких людей определяет расчётное время эвакуации. Приложение проверяет, отвечают ли заложенные в программу значения тем измерениям, из которых они получены, и согласуется ли расчёт с независимыми натурными рядами.

Методика [1, прил. 2, табл. П2.2] делит маломобильные группы населения на М1, М2, М3 и М4, наследуя это деление своду правил [4]. К М1 отнесены пожилые, немощные, беременные и дошкольники, к М2 слепые, глухие и с одной дополнительной опорой, к М3 с двумя опорами, к М4 на креслах-колясках. Для каждой группы заданы площадь проекции f [1, прил. 2, п. 10, табл. П2.5] и параметры V_0, a, D_0 по видам пути [1, табл. П2.7]. Числа выведены из наблюдений главы 3 монографии [11] и работ по домам-интернатам и больницам [13;16;20;17]. Приложение сопоставляет каждую величину с её натурным источником и с независимым рядом.

Таблица 104. Величины профилей и их натурные источники

Что сопоставляется	Натурная группа	Источник
скорость свободного движения, кривая «скорость–плотность» по трём видам пути и интенсивность через проём	с поражением опорно-двигательного аппарата (далее – ОДА): без опор, с одной опорой, с двумя опорами	[11, табл. 3.1–3.5, с. 65–70]
то же	слепые и слабовидящие, знакомый и незнакомый путь	[11, табл. 3.8–3.12, с. 79–82]
то же	глухие и слабослышащие	[11, табл. 3.13–3.17, с. 82–84]
время преодоления проёма b = 1,2 м, 30 замеров на плотность, и интенсивность через проём	участники на креслах-колясках	[11, табл. 3.6, 3.7, с. 75–78]
кривые и наибольшая интенсивность	престарелые в домах-интернатах и больницах	[16, табл. 2 и 3;13, табл. 3.8, с. 56]
независимый ряд	пациенты поликлиники, учебная эвакуация 11-этажного корпуса	[21, табл. 2.2, 2.3, 2.7]

Все ряды опубликованы. Глава 3 монографии [11] – источник чисел табл. П2.7 методики. Совпадение профилей «М3 одна опора», «М2 слепые», «М2 немощные» и «М1 глухие» с этими рядами есть сверка библиотеки с этим источником, а не независимая валидация по [3, п. 6.1]. Независимый ряд здесь один: поликлиника [21].

Эталон – натурные математические ожидания скорости свободного движения V_0 (6 пар профиля и натурной группы) и ряды наибольшей интенсивности через проём b = 1,2 м, 8 пар. В эталон входят также три точки экспериментальной кривой «скорость–плотность» престарелых и времена преодоления проёма на трёх плотностях с 95-процентными доверительными интервалами. Опыты относятся к валидации, и вывод «в допуске» делается по допуску документа ±20 %. Собственный критерий источника для кресла-коляски (попадание расчётного времени прохода проёма в доверительный интервал) приводится для сведения. Обозначения: b – ширина проёма, во всех постановках 1,2 м. Δ обозначает отклонение расчёта от экспериментального значения.

Опыты с креслами-колясками проведены в психоневрологическом интернате: 67 участников, из них 34 на креслах-колясках. Наблюдения за престарелыми и за участниками с поражением опорно-двигательного аппарата велись видеосъёмкой с масштабной сеткой 1 × 1 м [14;15].



а *б*

Рис. 3.19. Активное маневрирование при движении по горизонтальному пути:
а – обгон; *б* – столкновение со стеной

Рисунок 173. Манёвры кресла-коляски в коридоре: а) обгон, б) столкновение со стеной (по [11], рис. 3.19)



а *б*

Рис. 3.20. Очередность движения через дверной проем:
а – при достижении дверного проема; *б* – при преодолении дверного проема;
1–3 – номер эвакуирующегося

Рисунок 174. Очередность прохождения дверного проёма участниками на креслах-колясках (по [11], рис. 3.20)

Таблица 3.6

Время преодоления дверного проема людьми на креслах-колясках в зависимости от плотности

Среднее значение плотности, м²/м²	Количество замеров	Среднее значение, с	Стандартное отклонение, с	95 % доверительный интервал	
				Нижняя граница	Верхняя граница
0,24	30	2,09	0,69	1,85	2,34
0,48	30	2,86	0,78	2,56	3,15
0,72	30	5,16	2,19	4,35	5,98

Рисунок 175. Время преодоления дверного проёма для трёх плотностей с 95 % доверительными интервалами (по [11], табл. 3.6)

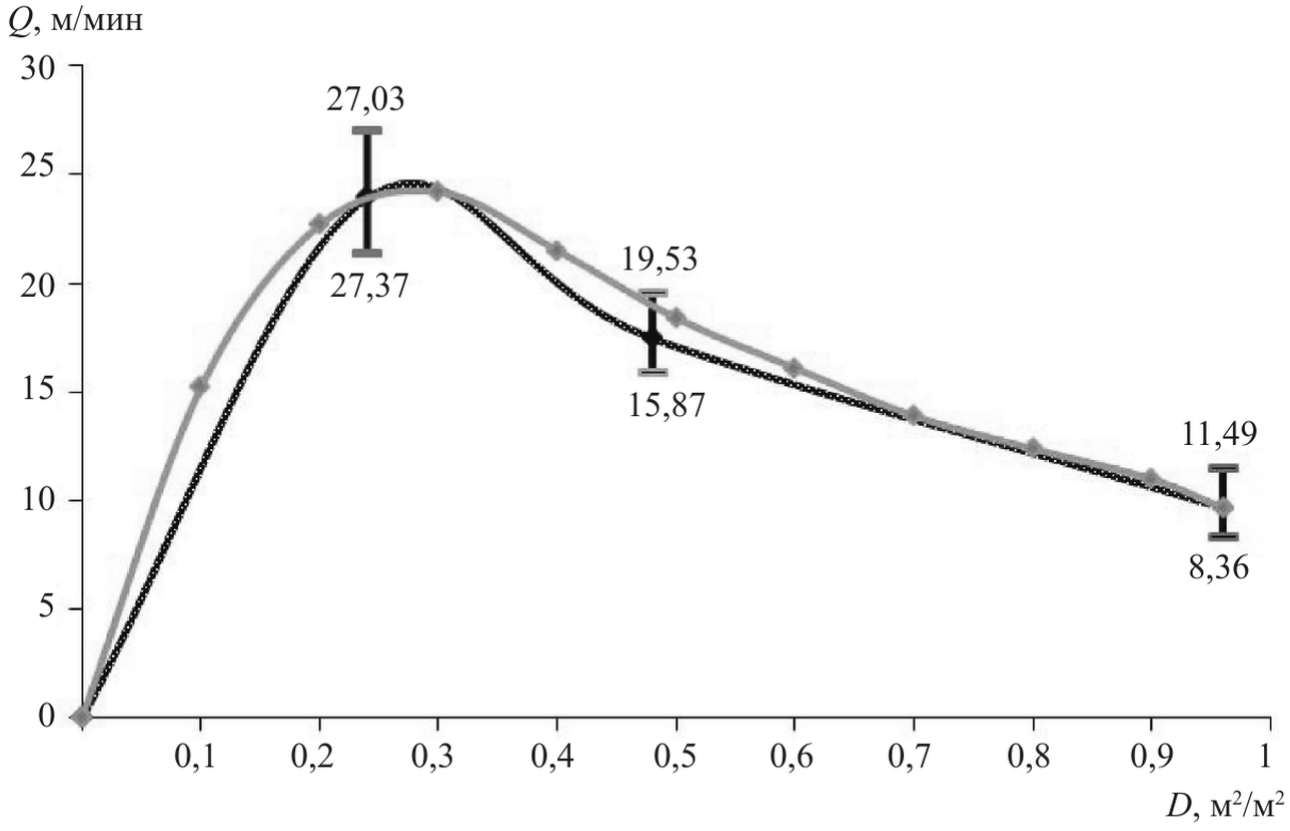


Рис. 3.21. Интенсивность движения через проем людей на креслах-колясках

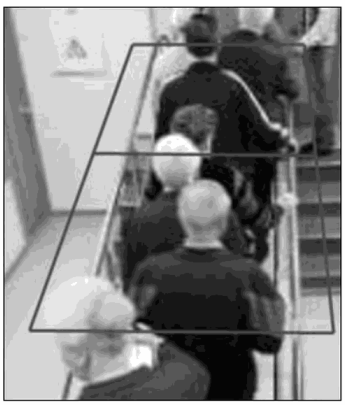
Рисунок 176. Интенсивность движения через проём участников на креслах-колясках (по [11], рис. 3.21)



а



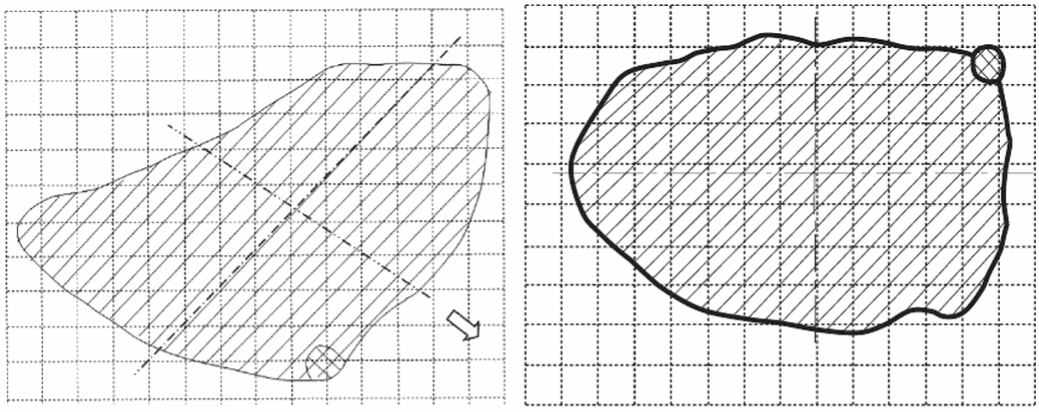
б



в

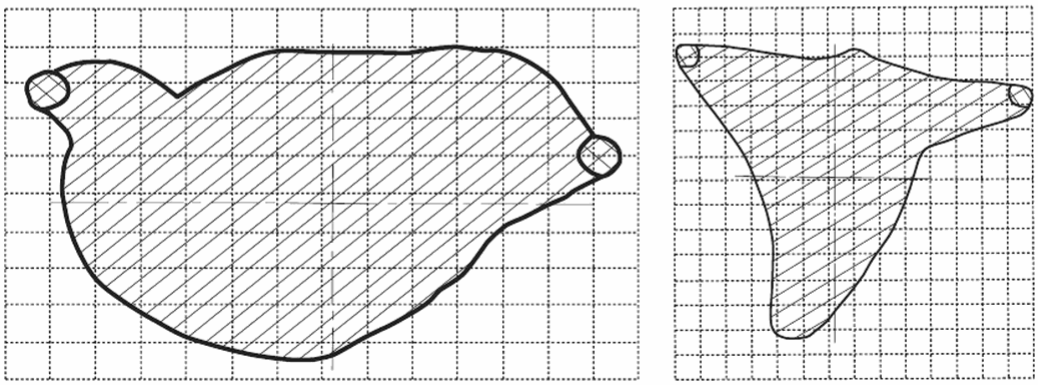
Рис. 1. Фрагменты анализа видеозаписей натурных экспериментов при передвижении престарелых людей по разным участкам пути: *а* – горизонтальный путь; *б* – лестница; *в* – пандус

Рисунок 177. Кадры анализа видеозаписей: а) горизонтальный путь, б) лестница, в) пандус (по [16], рис. 1)



а *б*

Рис. 10. Человек, передвигающийся с одной дополнительной опорой: *а* — статический габарит ($f = 0{,}175$ м^2); *б* — динамический габарит ($f = 0{,}210$ м^2)



а *б*

Рис. 11. Человек, передвигающийся с двумя дополнительными опорами: *а* — статический габарит ($f = 0{,}192$ м^2); *б* — динамический габарит ($f = 0{,}226$ м^2)

Рисунок 178. Замеренные проекции человека с одной и с двумя дополнительными опорами (по [14], рис. 10 и 11)

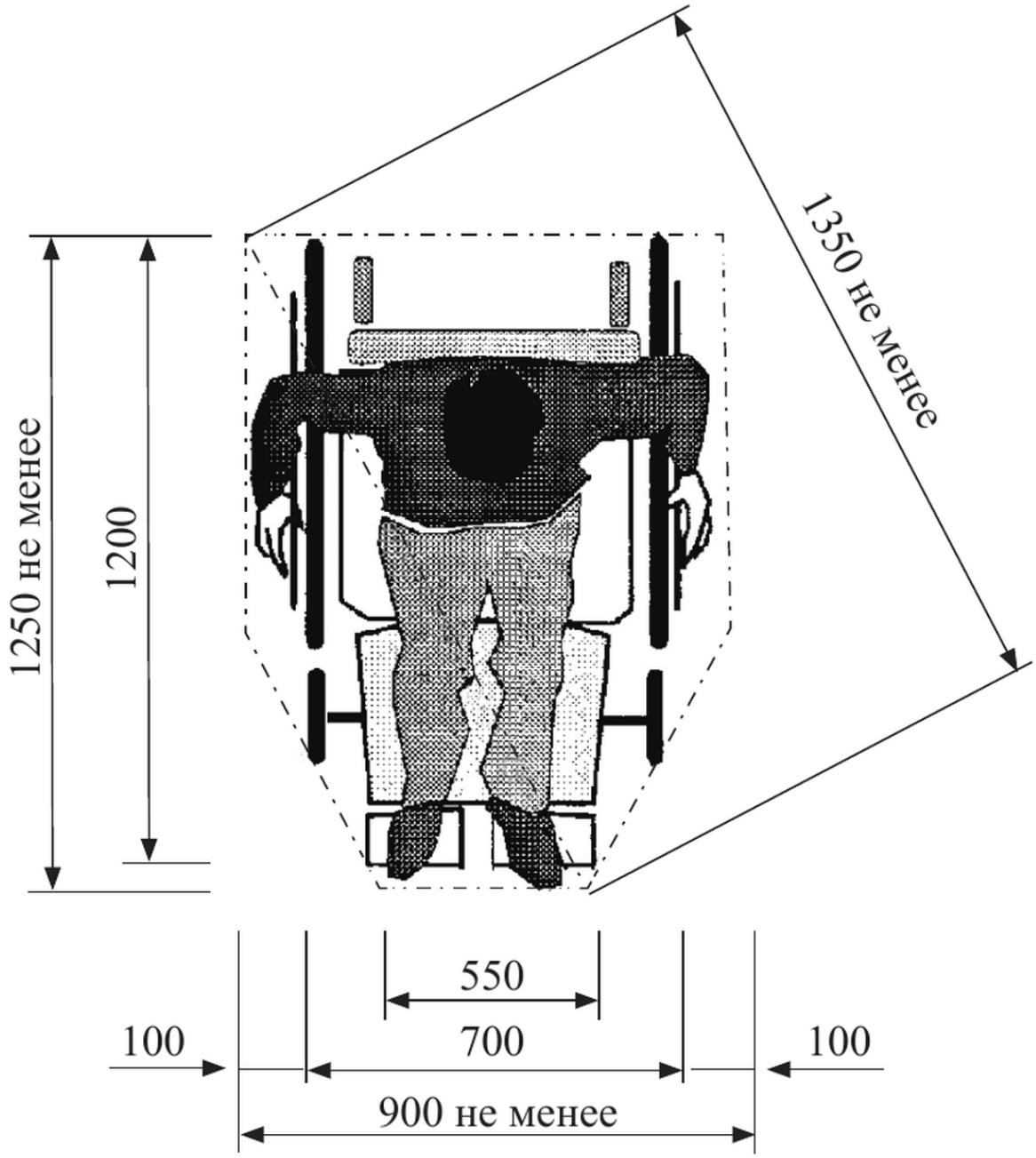


Рис. 3.14. Статические и динамические габариты человека на кресле-коляске по данным СП 59.13130

Рисунок 179. Статические и динамические габариты человека на кресле-коляске (по [11], рис. 3.14)

Нормируемые величины, с которыми проводится сопоставление, заданы тремя таблицами приложения № 2 методики.

Таблица П2.2

Группы мобильности	Общие характеристики людей групп мобильности
М1	Люди, не имеющие инвалидности, со сниженной мобильностью (пожилые люди (старше 60 лет), дети дошкольного возраста, беременные женщины), а также глухие и слабослышащие
М2	Пожилые немощные люди (имеющие инвалидность или хронические заболевания), слепые и слабовидящие люди
М3	Люди трудоспособного возраста с поражением опорно-двигательного аппарата
М4	Инвалиды, передвигающиеся на креслах-колясках
НМ	Немобильные граждане (люди, не имеющие возможности передвигаться самостоятельно, например, люди с травмами опорно-двигательного аппарата). Людей, передвигающихся несамостоятельно на кресле-коляске, следует относить к группе НМ.
НТ	Нетранспортабельные люди (Люди, действия по транспортировке которых являются недопустимыми вследствие прямой угрозы жизни, вызванной такой транспортировкой.)
НО	Люди с ограниченной степенью свободы, в том числе люди с психическими отклонениями (Порядок эвакуации людей, относящихся к группе НО, определяется инструкцией о мерах пожарной безопасности для конкретного здания.)

Рисунок 180. Классификация маломобильных групп населения М1, М2, М3, М4, НМ, НТ, НО (по [1], табл. П2.2)

Таблица П2.5

Площадь горизонтальной проекции людей с ограниченной мобильностью, м^2/чел.

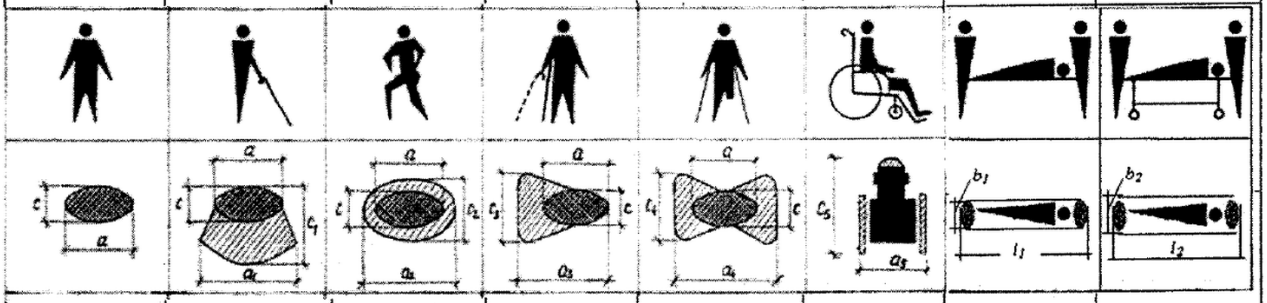
Здоровые люди, слабослышащие, с ограничением умственной деятельности	Слепые	С поражением опорно-двигательного аппарата					
		передвигающиеся без дополнительных опор	передвигающиеся с одной дополнительной опорой	передвигающиеся с двумя дополнительными опорами	передвигающиеся на креслах-колясках	транспортируемые на носилках	транспортируемые на каталках
1	2	3	4	5	6	7	8
							
a =0,28	a_1 = 0,72	a_2 = 0,40	a_3 = 0,50	a_4 = 0,50	a_5 = 0,80	b_1 =0,50	b_2 =0,75
c =0,46	c_1 = 0,82	c_2 = 0,75	c_3 = 0,65	c_4 = 0,90	c_5 = 1,20	l_1 =2,10	l_2 =2,10
f =0,10	f =0,40	f =0,25	f =0,20	f =0,30	f =0,96	f =1,05	f =1,58

Рисунок 181. Площадь проекции человека с ограниченной мобильностью: силуэты и эллипсы с осями (по [1], табл. П2.5)

Таблица П2.7

Значения величин a_i, D_{0i} и V_{0i} для определения параметров движения людских потоков, состоящих из людей, относящихся к МГН на разных участках пути эвакуации

Вид пути	a_i	D_{0i},чел./м^2	V_{0i},м/мин
Пожилые люди (старше 60 лет)			
Горизонтальный	0,295	0,51	80
Проем	0,295	0,65	80
Лестница вниз	0,400	0,89	70
Лестница вверх	0,305	0,67	60
Пожилые немощные люди (имеющие инвалидность или хронические заболевания)			
Горизонтальный	0,428	0,96	25,00
Проем	0,456	1,02	20,00
Лестница вниз	0,505	1,26	20,00
Лестница вверх	0,338	0,56	20,00
Пандус вниз	0,353	0,58	25,00
Пандус вверх	0,368	0,72	15,00
Дошкольники (дети 3 – 7 лет)			
Горизонтальный	0,275	0,78	60
Проем	0,350	1,2	60
Лестница вниз	0,190	0,64	47
Лестница вверх	0,275	0,76	47
Дети с ограниченными возможностями			
Горизонтальный	0,29	0,60	51,00
Проем	0,30	0,67	47,00
Лестница вниз	0,21	0,63	23,00
Лестница вверх	0,30	0,69	20,00
Люди трудоспособного возраста с поражением опорно-двигательного аппарата			
Горизонтальный	0,414	0,77	44,00
Проем	0,345	0,57	38,00
Лестница вниз	0,422	0,96	24,00
Лестница вверх	0,313	0,74	14,00
Слепые и слабовидящие люди			
Горизонтальный	0,371	0,73	26,00
Проем	0,271	0,77	17,00
Лестница вниз	0,519	0,97	21,00
Лестница вверх	0,387	0,82	18,00
Глухие и слабослышащие люди			
Горизонтальный	0,301	0,58	82,00
Проем	0,328	0,73	82,00
Лестница вниз	0,380	0,91	82,00
Лестница вверх	0,344	0,72	54,00
Беременные женщины			
Горизонтальный	0,404	0,991	56,42
Проем	0,427	1,033	49,47
Лестница вниз	0,336	0,786	42,35
Лестница вверх	0,411	1,312	31,25
Инвалиды, передвигающиеся на креслах-колясках			
Горизонтальный	0,400	0,141	60,00
Пандус вниз	0,400	0,141	60,00
Пандус вверх	0,420	0,156	40,00

Рисунок 182. Значения a, D_0 и V_0 для маломобильных групп по видам пути (по [1], табл. П2.7)

Наблюдения велись у действующих путей, а не на построенной для расчёта постановке, поэтому геометрия участка, число участников и их размещение источниками не заданы. Воспроизвести расчётом можно только опыт с креслом-коляской.

Таблица 105. Полнота пяти натурных наборов

Набор	Что содержит источник	Чего в нём нет	Как восполнено	Сверка кривых	Воспроизведение расчётом
три набора монографии: ОДА, слепые, глухие [11, табл. 3.1–3.17]	V_0, a, D_0 и ряды по интервалам плотности с числом замеров и доверительными интервалами	геометрия участка, ширина проёма, число участников, расстановка	площадь проекции взята по [1, прил. 2, п. 10]	полные	недостаточные
престарелые в домах-интернатах и больницах [16; 13]	параметры кривых по видам пути и наибольшая интенсивность через проём	то же	кривая смешанного потока применена ко всему контингенту	полные	недостаточные
кресло-коляска [11, табл. 3.6, 3.7, с. 75–78]	b = 1,2 м, коридор не менее 1,8 м, 67 участников, доля колясочников 50 %, f = 0,96 м², по 30 замеров на плотность	план помещения, база замера времени, расстановка, состав потока	поток принят однородным; время преодоления проёма принято равным среднему интервалу между пересечениями створа	достаточные с допущениями	достаточные с допущениями

Единственный набор, пригодный для воспроизведения с допущениями, – кресло-коляска, и в нём **база замера времени не указана**. Принятая трактовка обоснована согласованностью табл. 3.6 и 3.7 источника при низкой плотности: интенсивности 23,3 м/мин отвечает интервал f/(q·b) = 2,06 с против табличных 2,09 с.

Г12.2 Расчётная модель и конфигурации расчёта

Три постановки, во всех проём b = 1,2 м.

- **Проём по профилям.** Комната 8 × 5 м с проёмом в стене, постановка и план общие с приложением Г2. Один профиль библиотеки на расчёт, замер удельного потока в установившейся фазе (15…85 % вышедших). Плотность расстановки 1,50 чел/м², 60 человек. У профилей с крупной проекцией она ниже: 1,25 и 50 человек у «М3 две опоры», 1,00 и 40 у «М2 слепые», 0,75 чел/м² и 30 у М4.
- **Кресло-коляска.** Коридор 1,8 × 40 м, профиль М4 (проекция 1,2 × 0,8 м, V_0 = 60 м/мин, время разгона 3,0 с), проём в торце. Три плотности 0,25 / 0,50 / 0,75 чел/м² и 18 / 36 / 54 человека, в постановке источника 0,24 / 0,48 / 0,72 м²/м² при f = 0,96 м².
- **Кривая «скорость–плотность».** Коридор 20 м со встроенным замером, расстановка 0,5…4,0 чел/м² с шагом 0,5. Замер после окончания разгона.

Расстановка равномерная шестиугольная, одна на постановку, поэтому разброса по начальному числу расстановки нет. Время начала эвакуации 0. Всего 22 расчёта с проёмом и 22 замера кривой.

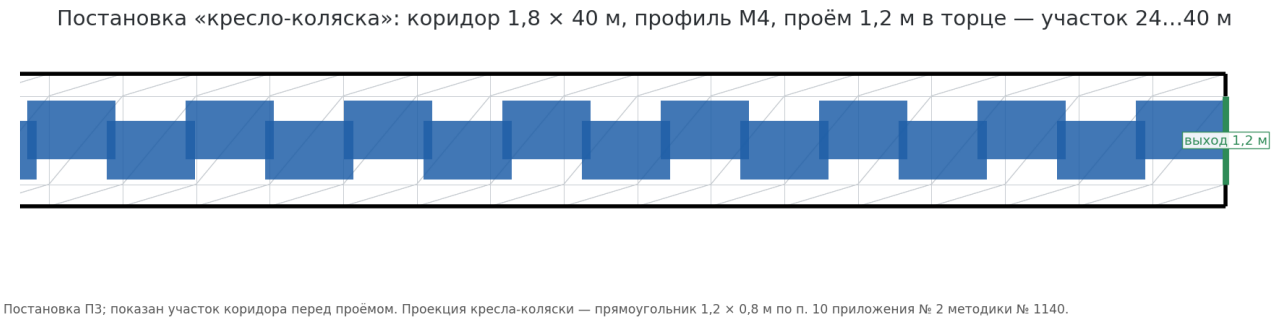


Рисунок 183. План модели: коридор 1,8 × 40 м, профиль М4, проём 1,2 м в торце (участок перед проёмом)



Рисунок 184. Кадр расчёта: очередь кресел-колясок перед проёмом на 45-й секунде

Профиль базовой конфигурации – группа мобильности, к которой относятся участники опыта: она назначается по [1, табл. П2.2] с табличными параметрами [1, табл. П2.7]. Для кресла-коляски это М4, для контингента домов-интернатов, больниц и поликлиник – «М2 немощные» в проёме и «М3 одна опора» на горизонтальном пути по рекомендации источника [13, с. 57]. Профиль выбран по фактической группе мобильности участников, тогда как по классу здания табл. П2.3 [1] предписывает для этих зданий группу М1. Её табличная скорость свободного движения по горизонтали 80,0 м/мин вдвое выше измеренной у престарелых (36,34 м/мин в смешанном потоке и 41,84 м/мин без опор). Расчёт по ней дал бы расчётное время эвакуации меньше экспериментального. Расхождение методики с фактическим составом людей – основное ограничение применения, следующее из приложения.

Таблица 106. Конфигурации расчёта приложения Г12

Параметр	Базовая конфигурация: профиль группы мобильности участников	Откалиброванная конфигурация	Источник значения
профиль группы мобильности	группа по фактическому составу участников [1, табл. П2.2] с табличными параметрами; кресло-коляска – М4, контингент домов-интернатов, больниц и поликлиник – «М2 немощные» и «М3 одна опора»	**не требуется**: условия опытов отвечают расчётному случаю методики – измерены те самые группы мобильности, для которых методика задаёт параметры, и заменять в расчёте нечего	[1, табл. П2.2, П2.7]; выбор группы для домов-интернатов, больниц и поликлиник – [13, с. 57]
скорость свободного движения V_0 по горизонтали	25,0 м/мин («М2 немощные») и 44,0 м/мин («М3 одна опора») – строки табл. П2.7	–	[1, табл. П2.7]; сопоставляется с измеренными 36,34 и 41,84 м/мин [16, табл. 2 и 3]
кривая «скорость–плотность»	формула (П2.1) с a и D_0 строки выбранного профиля	–	[1, табл. П2.7]
площадь проекции f	величина строки выбранного профиля: 0,20 м² у «М2 немощных» и «М3 одна опора», 0,96 м² у М4	–	[1, прил. 2, п. 10]
предел потока проёма	1,42 чел/(с·м)	–	[1, табл. П2.8]
режим УАМ	выключен: предел задан значением	–	устройство переключателя – раздел 2.6
расстановка, время начала эвакуации	равномерная, одна на постановку; время начала эвакуации 0	–	источники расстановки не задают

Откалиброванной конфигурации в этом приложении нет. Калибровка заменяет табличный параметр значением, измеренным в опыте. Здесь же измеренные величины и есть то, что сравнивается с таблицами методики, а все параметры расчёта взяты из этих таблиц без изменения. Единственная величина, которую пришлось назначить сверх источника, – расстановка, и она одинакова во всех расчётах.

Г12.3 Результаты и анализ

Удельный поток J приводится в чел/(с·м). Натурные ряды источников даны в чел/(м·мин) и переведены делением на 60. Предел потока проёма базовой конфигурации равен 1,42 чел/(с·м). В шкале источников это 85,2 чел/(м·мин).

СКОРОСТИ ГРУПП МЕТОДИКИ ПРОТИВ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ЗНАЧЕНИЙ

Таблица 107. Скорость свободного движения по горизонтальному пути: профиль против экспериментальных значений

Профиль библиотеки	V_0 профиля, м/мин	Натурная группа	V_0 эксперимента, м/мин	Источник	Δ	В допуске ±20 %
M3 одна опора	44,0	ОДА, одна опора	44,03	[11, табл. 3.5, с. 70]	**−0,1 %**	да
M2 слепые	26,0	слепые, незнакомый путь	26,34	[11, табл. 3.12, с. 82]	**−1,3 %**	да
M1 глухие	82,0	глухие и слабослышащие	85,47	[11, табл. 3.13–3.15]	−4,1 %	да
M3 одна опора	44,0	престарелые без опор	41,84	[16, табл. 2]	**+5,2 %**	да
M3 одна опора – профиль контингента домов-интернатов, больниц и поликлиник	44,0	престарелые, смешанный поток	36,34	[16, табл. 3]	**+21,1 %**	**нет**
M3 две опоры	44,0	ОДА, две опоры	35,34	[11, табл. 3.5, с. 70]	**+24,5 %**	**нет**
M2 немощные	25,0	престарелые с одной опорой	25,96	[16, табл. 2]	**−3,7 %**	вне счёта: пара приведена для сверки библиотеки
M2 слепые	26,0	слепые, **знакомый** путь	49,79	[11, табл. 3.12, с. 82]	−47,8 %	вне счёта: профиль отвечает незнакомому пути
M0-3	100,0	ОДА, без опор	62,05	[11, табл. 3.5, с. 70]	**+61,2 %**	вне счёта: профиль не маломобильной группы



Рисунок 185. Маломобильные группы: скорость свободного движения профилей базовой конфигурации против натурных математических ожиданий, м/мин

В допуск ±20 % попадают 4 пары из 6. В двух парах табличная скорость больше измеренной на 21,1 и 24,5 %, и расчётное время движения по горизонтали меньше действительного. Первые три строки дают сверку библиотеки с источником нормируемых чисел: совпадение в пределах 4 %. Причины остальных расхождений разобраны ниже. На плотностях 1…6 чел/м² кривая «скорость–плотность» профиля ниже экспериментальной на 9…19 % (−18,9…−0,1 % у «М3 одна опора», −18,1…−1,3 % у «М2 слепых», −15,0…−4,1 % у «М1 глухих»), и расчётное время эвакуации больше.

Таблица 108. Горизонтальный путь, смешанный поток престарелых в стационарах домов-интернатов [16, табл. 3]

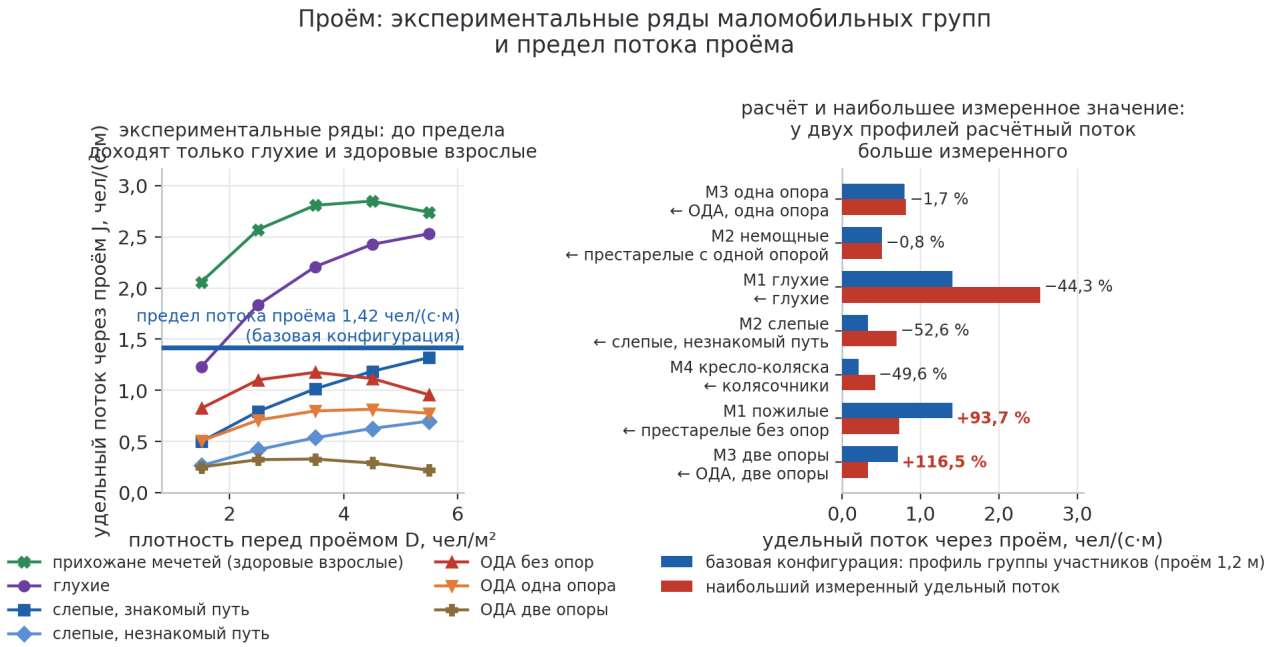
D по площади, чел/м²	**Эксперимент, м/мин**	**Базовая конфигурация: профиль «М3 одна опора» (V_0 = 44,0 м/мин), Δ**	**В допуске ±20 %**
0,50	36,3	+19,4 %	вне счёта: замер на пороге свободного движения
0,89	36,3	**+2,2 %**	да
1,06	36,3	**−1,6 %**	да
1,69	27,7	+9,1 %	вне счёта: промежуточный интервал ряда
2,01	23,0	**+21,9 %**	**нет**

По трём точкам ряда, по которым ведётся счёт, в допуск ±20 % попадают две. В третьей расчётная скорость больше измеренной на 21,9 %. Область применимости профилей маломобильных групп по плотности расстановки ограничена значением 2,5 чел/м². Выше него при профилях «М3 одна опора» и «М2 немощные» движение в расчёте прекращается, тогда как в опытах при тех же плотностях скорость составляет 4,0…12,4 м/мин.

ИНТЕНСИВНОСТЬ ЧЕРЕЗ ПРОЁМ

Таблица 109. Удельный поток через проём b = 1,2 м: расчёт против натурного максимума

Профиль	**Число человек**	**Расчёт J, чел/(с·м)**	**Натурная группа**	**Натурный максимум J, чел/(с·м)**	**Источник**	**Δ**	**В допуске ±20 %**
М0-3 (летняя одежда)	60	1,383	*самопроверка предела 1,42 чел/(с·м)*	1,420	[1, табл. П2.8]	−2,6 %	да
М3 одна опора	60	0,801	ОДА, одна опора	0,815	[11, табл. 3.4]	**−1,7 %**	да
М2 немощные	60	0,507	престарелые с одной опорой	0,512	[13, табл. 3.8]	**−1,0 %**	да
М1 глухие	60	1,409	глухие и слабослышащие	2,532	[11, табл. 3.16]	−44,4 %	**нет**
М2 слепые	40	0,331	слепые, незнакомый путь	0,699	[11, табл. 3.11]	−52,6 %	**нет**
М4 кресло-коляска	30	0,212	участники на креслах-колясках	0,420	[11, табл. 3.7]	−49,5 %	**нет**
М3 одна опора – профиль контингента домов-интернатов, больниц и поликлиник	60	0,801	престарелые без опор	0,727	[13, табл. 3.8]	**+10,2 %**	да
М3 две опоры	50	0,711	ОДА, две опоры	0,328	[11, табл. 3.4]	**+116,8 %**	**нет**



Эксперимент: Самошин «Состав людских потоков…» (2016), табл. 3.4 (с. 68), 3.7 (с. 78), 3.11 (с. 81), 3.16 (с. 84); Истратов, табл. 3.8 (с. 56); Шахуов (2019), табл. 3.3. Расчёт — комната 8×5 м, проём 1,2 м, базовая конфигурация (профиль группы мобильности участников), замер в установившейся фазе.

Рисунок 186. Проём: натурные ряды маломобильных групп против предела потока проёма и расчёт по профилям базовой конфигурации. Интенсивность по осям в чел/(м·мин)

В допуск ±20 % попадают 4 пары из 8. В трёх парах расчётный поток меньше измеренного на 44,4…52,6 %, и расчётное время прохода проёма больше действительного. В одной паре («М3 две опоры») он, наоборот, выше на 116,8 %, и время прохода в расчёте меньше. Ни в одной группе маломобильных, кроме глухих, измеренный поток не достигает предела 1,42 чел/(с·м). Наибольшие значения составляют 1,176 у людей с поражением опорно-двигательного аппарата без опор и 1,321 у слепых по знакомому пути. Ряд по прихожанам мечетей [22, табл. 3.3], приведённый на рисунке для сравнения, – единственный выше предела. Независимый ряд по поликлинике подтверждает выбор профиля по фактической группе мобильности. Рекомендованная там скорость свободного движения пациентов 54,0 м/мин по горизонтали и 27,0 м/мин по лестнице вниз [21, табл. 2.7] против 100 и 100 м/мин у М0-3.

КРЕСЛО-КОЛЯСКА

Плотность в постановке источника задана в м²/м², в скобках дан перевод в чел/м² при f = 0,96 м². Эталон – по 30 замеров на каждое значение [11, табл. 3.6, с. 77].

Таблица 110. Время преодоления дверного проёма участником на кресле-коляске

D, м²/м² (чел/м²)	Число человек	Эксперимент, с	95 % доверительный интервал, с	Базовая конфигурация, с	Δ, с	Δ, %	В допуске ±20 %	В интервале источника
0,24 (0,25)	18	2,09	1,85…2,34	2,95	**+0,86**	**+41,1 %**	**нет**	нет
0,48 (0,50)	36	2,86	2,56…3,15	2,79	−0,07	−2,4 %	да	да
0,72 (0,75)	54	5,16	4,35…5,98	2,87	**−2,29**	**−44,4 %**	**нет**	нет



Эксперимент: Самошин «Состав людских потоков...» (2016), табл. 3.6, с. 77 — психоневрологический интернат, 67 участников, из них 34 на креслах-колясках, доля колясочников в потоке 50 %, коридор не менее 1,8 м, проём 1,2 м.

Рисунок 187. Кресло-коляска: время преодоления проёма 1,2 м, экспериментальные значения с доверительными интервалами против расчёта базовой конфигурации по профилю M4

В допуск ±20 % попадает 1 плотность из 3, середина диапазона. По критерию источника в доверительный интервал укладывается та же точка. На низкой плотности расчётное время преодоления проёма больше измеренного на 41,1 %, на высокой меньше на 44,4 %. Расчётная интенсивность от плотности не зависит, тогда как измеренная уменьшается с 24,2 м/мин при D = 0,3 м²/м² до 9,7 м/мин при D = 0,96 м²/м².

АНАЛИЗ ОТКЛОНЕНИЙ

Измеренные потоки маломобильных групп, кроме глухих, ниже предела потока проёма, и предел на них не действует. Расчётный поток определяется скоростью и проекцией профиля, что подтверждают совпадения по «M3 одна опора», −1,7 %, и «M2 немощным», −1,0 %. Исключение – глухие: измеренный максимум 2,532 чел/(с·м) выше предела. Расчётный поток ограничен значением 1,42 чел/(с·м), и отклонение −44,4 % целиком объясняется этим ограничением. Положения переключателя предела описаны в разделе 2.6.

Расхождение −52,6 % у слепых пределом потока проёма не объясняется: измеренные 0,699 чел/(с·м) много ниже 1,42, и предел на них не действует. Проекция задана методикой площадью: 0,20 м² с одной дополнительной опорой, 0,30 с двумя, 0,40 у слепых, 0,96 у кресла-коляски. Ядро представляет её равновеликим кругом, а для кресла-коляски многоугольником (раздел 2.2). В проёме движение идёт в один ряд, шаг очереди определяется размером проекции вдоль движения, и при круге 0,714 м у слепых число проходящих через створ b = 1,2 м меньше измеренного. Круг 0,505 м у «M2 немощных» и «M3 одна опора» ограничивает укладку проекций значением около 4,5 чел/м².

В натурных данных различаются одна и две дополнительные опоры: 44,03 и 35,34 м/мин по горизонтали, 24,09 и 12,86 вниз. Различаются знакомый и незнакомый путь у слепых (49,79 против 26,34 м/мин), престарелые в смешанном потоке и по отдельности, а библиотека профилей следует табл. П2.2,

где таких различий меньше. Случаи, в которых расчётная скорость и поток больше измеренных, – следствие принятой классификации, а не ошибки расчёта движения. Для людей с двумя опорами профиля, отвечающего их группе, в библиотеке нет. Именно на этой паре видно, что согласование по скорости не обеспечивает согласования по потоку: различию +24,5 % отвечает различие удельного потока +116,8 %. Поток через створ зависит и от скорости, и от размера проекции.

Невоспроизводимым остаётся следующее.

- База замера времени преодоления проёма участниками на креслах-колясках не описана. При высокой плотности сам источник внутренне не сходится: интервалы 3,56 и 5,16 с в табл. 3.7 и 3.6 различаются. Кривая «скорость–плотность», собранная по первой из них, приводит к скорости свободного движения 152 м/мин, невозможной для кресла-коляски.
- Рост времени прохода проёма с плотностью для кресел-колясок не воспроизводится: через створ b = 1,2 м агенты проходят по одному, и очередь образуется начиная с самой низкой из трёх плотностей.
- Расхождение по потоку слепых через проём остаётся: уменьшить его можно было бы только отступлением от площади проекции, заданной [1, прил. 2, п. 10].
- Плотность в наборах, кроме кресла-коляски, – признак замера, а не заданное условие, поэтому расчётом здесь проверяются только проём и геометрия проекции.

Г12.4 Выводы

Приложение сопоставляет расчёт в базовой конфигурации, с профилем той группы мобильности, к которой относятся участники опыта, и табличными параметрами методики, с натурными рядами, из которых эти параметры получены. В допуск входит половина пар по удельному потоку через проём и большая часть по скорости свободного движения; по кривой «скорость–плотность» престарелых в допуске большинство точек, по времени преодоления проёма креслом-коляской – одна из трёх плотностей, та же, что и по критерию источника. Отклонения разного знака: у глухих, слепых и кресел-колясок расчётный поток меньше измеренного, и время прохода в расчёте больше действительного; у людей с двумя опорами он больше, и расчётное время прохода меньше. Откалиброванная конфигурация не требуется: измеренные величины и есть то, что сравнивается с таблицами методики, а все параметры расчёта взяты из этих таблиц без изменения. Расхождения объясняются не расчётом движения, а дробностью классификации [1, табл. П2.2]: для людей с двумя опорами и для слепых по знакомому пути профиля, отвечающего их группе, в библиотеке нет.

Ограничение применения в рассмотренных постановках: профили «М2 немощные» и «М3 одна опора» применимы при плотности расстановки не выше границы, указанной в Г12.3; их крупная проекция ограничивает укладку, а при большей плотности движение в расчёте прекращается. Для домов-интернатов, больниц и поликлиник профиль следует назначать по фактической группе мобильности людей: предписанная классом здания группа М1 [1, табл. П2.3] имеет табличную скорость вдвое выше измеренной у престарелых.

Приложение Г13. Гидравлическая модель SFPE: второе применение режима УАМ

Г13.1 Источник и данные

Руководство SFPE по поведению людей при пожаре [38] излагает **гидравлическую модель** движения людского потока и приводит два разобранных примера с полным ходом вычислений. Гидравлическая модель – расчётный метод, принятый за рубежом для ручной оценки времени эвакуации. Её расчётная схема восходит к работе Нельсона и Маурера [36;37]. Удельный поток, пограничный слой и скорости взяты по [38], размеры источника заданы в футах и дюймах и переведены в метры (Г13.2). Она устроена так же, как упрощённая аналитическая модель приложения № 6 методики [1]: обе отыскивают самый узкий створ на пути и считают время по его пропускной способности. Её примеры служат режиму УАМ независимым аналитическим решением, не связанным с отечественной нормативной базой. Первое применение того же режима – задачи пособия Академии ГПС (приложение Г3). Сравнение верификационное, допуск документа ±10 %.

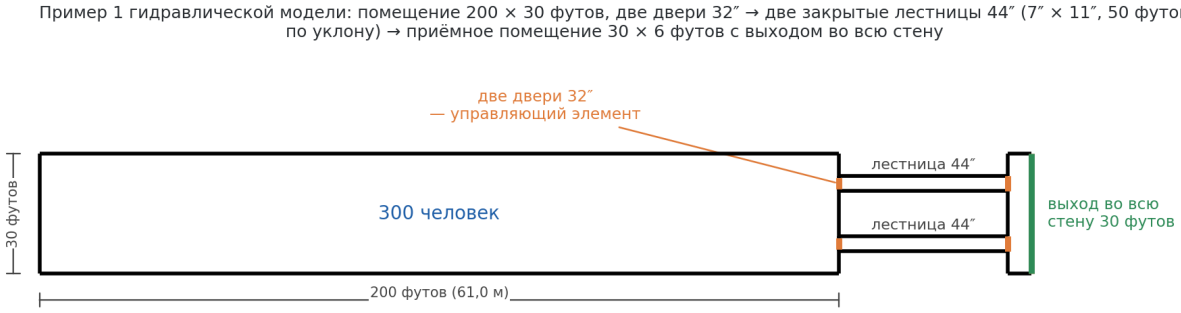


Рисунок 188. Постановка примера 1: исходное помещение, две двери на лестницы, приёмное с выходом во всю стену (по [38], пример 1 гидравлической модели)

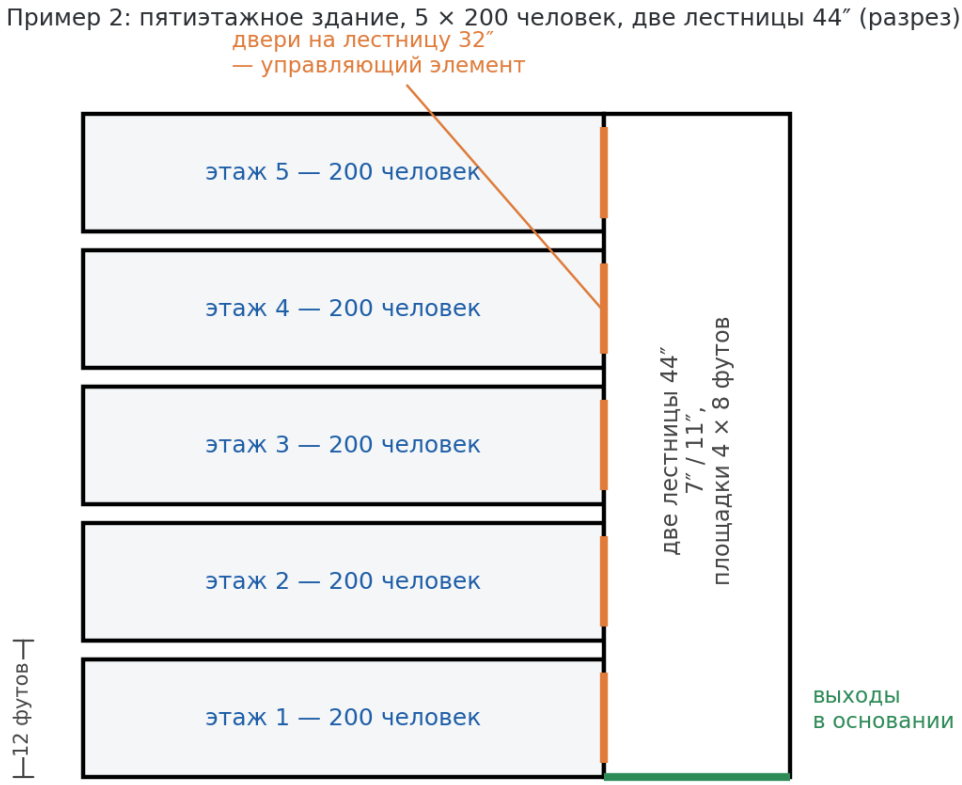


Схема начерчена по словесному описанию примера 2 гидравлической модели (SFPE Guide to Human Behavior in Fire, 2-е изд., 2019).

Рисунок 189. Постановка примера 2, разрез пятиэтажного здания с двумя лестницами (по [38], пример 2 гидравлической модели)

Аналитическое решение – ответ гидравлической модели. Порядок тот же, что в упрощённой аналитической модели методики: найти **управляющий элемент**, створ с наименьшей пропускной способностью. Время раскладывается на подход первого человека T_1, пропуск всех через него T_2 и проход последним оставшегося пути T_3. В обеих постановках управляющий элемент – дверь на лестницу $b_{дв}$ = 0,813 м. Поток через неё вычисляется по **эффективной** ширине: два пограничных слоя по 0,15 м вычитаются из ширины двери. При удельном потоке модели 1,32 чел/(с·м) он равен 1,32 · 0,508 = 0,671 чел/с. Скорости равны 0,85 · 1,40 = 1,19 м/с по горизонтали и 0,85 · 1,08 = 0,92 м/с по маршу.

Таблица 111. Аналитическое решение по двум примерам гидравлической модели

Пример	Человек	T_1, с	T_2, с	T_3, с	Аналитическое решение T, с
1	300	1,0	225,0	19,2	**245,2**
2	1000	10,9	596,5	1,0	**608,4**

В примере 1 T_2 = 300 / (2 · 0,671). В примере 2 на лестницу приходится по 400 человек (200 с первого этажа уходят боковыми выходами), T_2 = 400 / 0,671. Собственного допуска источник не задаёт, оценка ведётся по допуску документа ±10 %.

Постановка и критерий заданы источником, данные полны по построению. T_1, T_2, T_3 и итог пересчитаны по формулам руководства [38], а не перенесены печатным числом.

Таблица 112. Что содержит источник и что принято сверх него

Данные	В источнике	Принято в модели
геометрия	словесное описание, без чертежа	планы начерчены по описанию, размеры переведены в метры
размещение в помещениях	числа заданы, размещение – нет	равномерная расстановка по всей площади, одна расстановка
время начала эвакуации	не задано	нулевое для всех
боковые выходы первого этажа (пример 2)	«собственные выходы», ширина не названа	четыре выхода по 2,0 м
площадь проекции f	не задана	0,1 м² [1]
кривая «скорость–плотность»	скорости 1,19 и 0,92 м/с, удельный поток 1,32 чел/(с·м)	кривая гидравлической модели по этим значениям; второй набор параметров – М0-3 [1, табл. П2.6]
удельный поток	24 чел/(мин·фут)	1,32 чел/(с·м) – одно значение на всё приложение

Г13.2 Расчётная модель и конфигурации расчёта

В примере 1 помещение 61,0 × 9,14 м, две двери 0,813 м в два марша 1,118 м (12 ступеней, 15,2 м по уклону). Из маршей двери 1,118 м ведут в приёмное помещение 9,14 × 1,83 м с выходом во всю стену 9,14 м.

В примере 2 пять этажей 40 × 20 м высотой 3,66 м. В каждой лестнице два марша шириной 1,118 м по 10 ступеней с площадкой 1,22 × 2,44 м между ними. На каждом этаже две двери 0,813 м в лестницы, выход из них в основании здания 0,813 м, на первом четыре боковых выхода по 2,0 м.

Параметры движения задаются двумя наборами, и оба применяются при обеих конфигурациях расчёта. Первый воспроизводит исходные данные источника: V_0 = 1,19 м/с, кривая «скорость–плотность» гидравлической модели, множитель марша 1,08/1,40. Удельный поток створа 1,32 чел/(с·м) при пограничном слое 0,15 м. Второй набор задаёт профиль М0-3 в летней одежде с V_0 = 1,67 м/с и кривыми методики. Он показывает, насколько результат зависит от параметров движения при неизменной расчётной схеме. Расстановка равномерная: в примере 1 это 300 человек на 557 м² ($D_{расст}$ ≈ 0,54 чел/м²), во втором 200 на этаж при 0,25 чел/м². Выполнено восемь расчётов: две постановки × два набора параметров × две конфигурации, по одной расстановке.

Откалиброванная конфигурация здесь – режим УАМ. Основание замены: аналитическое решение получено по гидравлической модели, построенной как упрощённая аналитическая, где поток через управляющий элемент ограничен пределом, который зависит от ширины створа. Режим УАМ воспроизводит такое ограничение по приложению № 6 методики [1].

Таблица 113. Конфигурации расчёта

Параметр	Базовая конфигурация	Откалиброванная конфигурация (режим УАМ)	Источник значения
предел потока проёма	задан числом на всех створах при выключенном режиме УАМ: 1,42 чел/(с·м) при наборе М0-3, 1,32 чел/(с·м) при наборе гидравлической модели	вычисляется по ходу расчёта: интенсивность подошедшего потока, переформирование, условие скопления и $q_{Dmax}(b)$	[1, табл. П2.8]: q_{Dmax} = 2,5 + 3,75·b м/мин при b < 1,6 м; значение 1,32 чел/(с·м) – [38]
предел на управляющей двери b = 0,813 м	1,42 · 0,813 = 1,154 чел/с при наборе М0-3; 1,32 · 0,813 = 1,073 чел/с при наборе гидравлической модели	2,5 + 3,75 · 0,813 = 5,55 м/мин – 0,752 чел/с (ширина учтена)	там же; перевод из м/мин через площадь проекции f = 0,1 м²
пограничный слой у створа	створ не сужает	створ не сужает	пограничного слоя в [1] нет; 2 × 0,15 м – величина гидравлической модели [38]
профиль и кривая «скорость–плотность»	два набора параметров	те же два набора	V_0 = 1,19 и 0,92 м/с, 1,32 чел/(с·м) – [38]; М0-3 – [1, табл. П2.6]

Четырёх чисел набора гидравлической модели в методике нет, все они взяты из [38], и положение переключателя режима УАМ от них не зависит.

Пример 1: модель

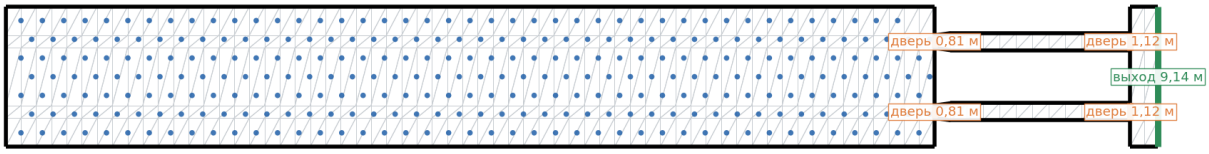
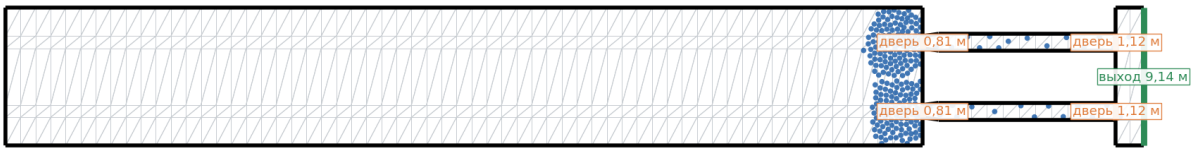


Рисунок 190. План модели примера 1: помещение с расстановкой, двери на лестницы, выход приёмного помещения

Пример 1, откалиброванная конфигурация (режим УАМ): очереди у дверей на лестницы — кадр расчёта, t = 60,0 с



Кадр расчёта копией сборки ядра.

Рисунок 191. Кадр расчёта примера 1 при откалиброванной конфигурации (режим УАМ): очереди у дверей на лестницы

Пример 2: модель (пять этажей наложены на плане)

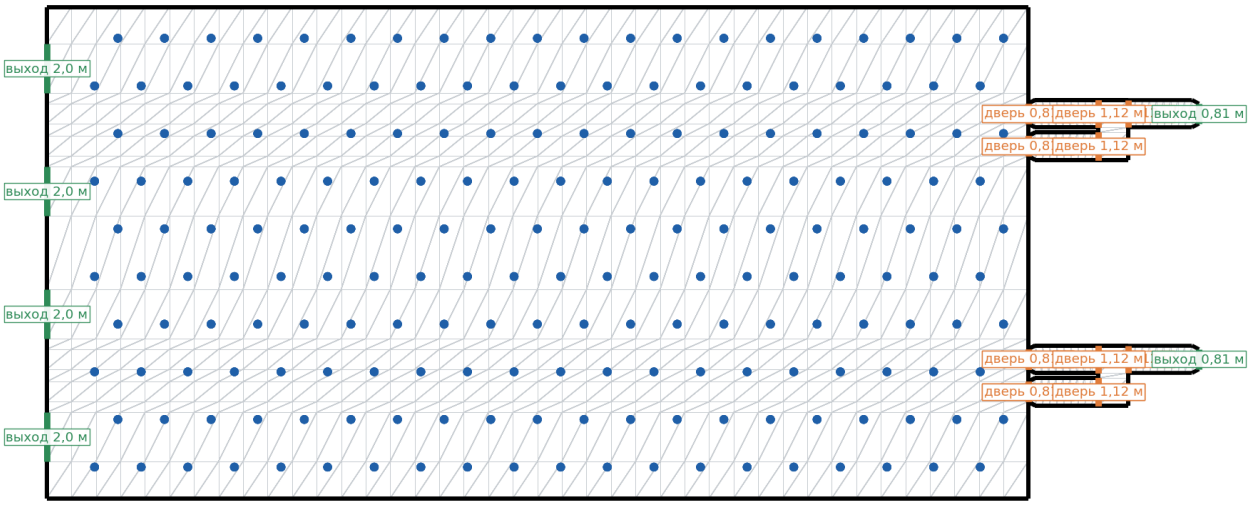


Рисунок 192. План модели примера 2, пять этажей наложены на плане

Г13.3 Результаты и анализ

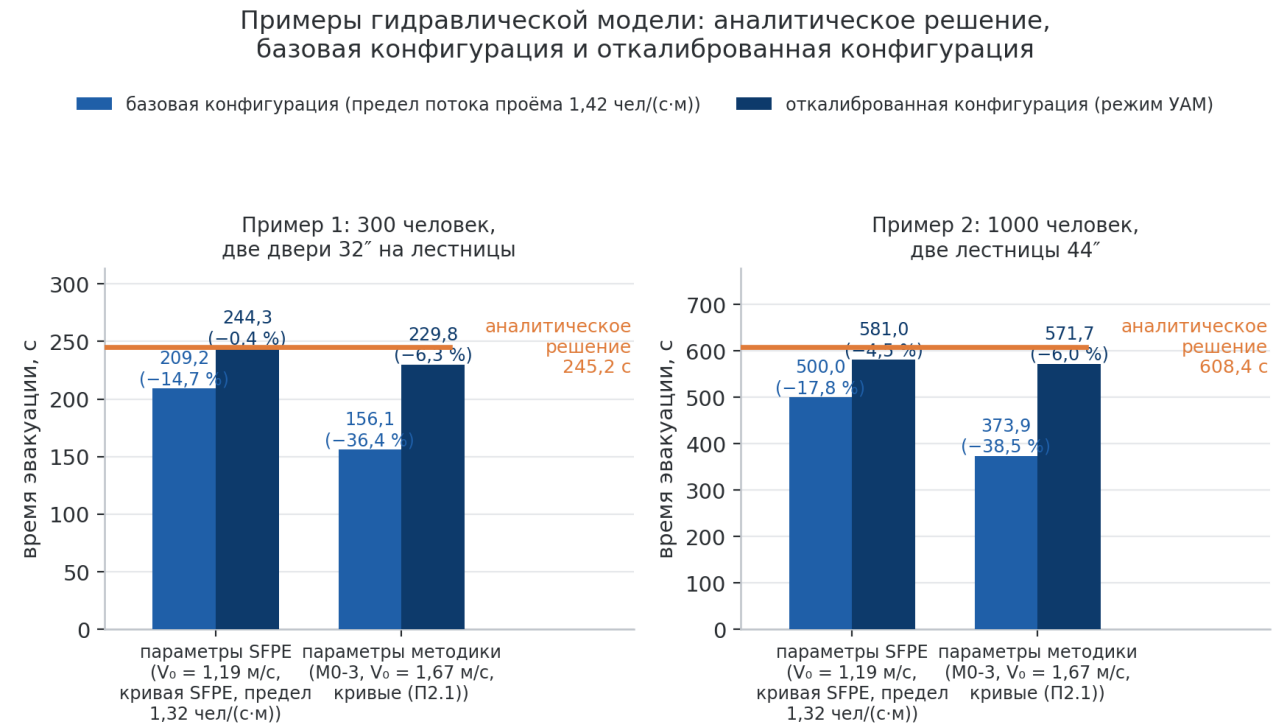
Таблица 114. Время эвакуации по двум примерам: аналитическое решение, базовая и откалиброванная конфигурации

Пример	Набор параметров	Аналитическое решение, с	Базовая, с	Δ	В допуске ±10 %	Откалиброванная (режим УАМ), с	Δ	В допуске ±10 %
1 (300 человек)	гидравлической модели	245,2	209,2	−14,7 %	нет	**244,3**	**−0,4 %**	да
1	методики	245,2	156,0	−36,4 %	нет	**229,8**	**−6,3 %**	да
2 (1000 человек)	гидравлической модели	608,4	500,0	−17,8 %	нет	**581,0**	**−4,5 %**	да
2	методики	608,4	373,9	−38,5 %	нет	**571,7**	**−6,0 %**	да

Таблица 115. Поток через управляющий элемент – дверь 0,813 м (ширина учтена), чел/с

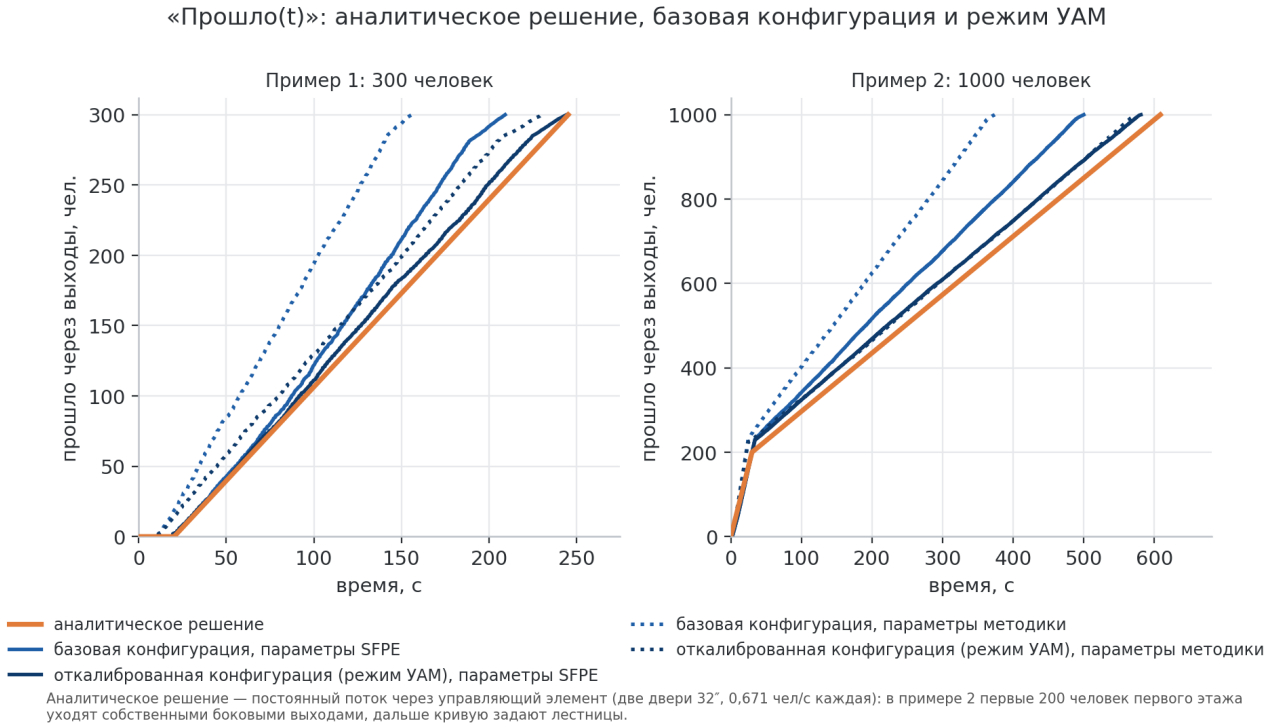
Конфигурация, набор параметров	Пример 1	Пример 2	Δ к аналитическому решению 0,671
базовая, набор гидравлической модели	0,857…0,896	0,831…0,833	+24…+34 %
базовая, набор методики	1,081…1,098	1,104…1,121	+61…+67 %
откалиброванная (режим УАМ), набор гидравлической модели	**0,701… 0,713**	**0,711… 0,713**	**+4…+6 %**
откалиброванная (режим УАМ), набор методики	**0,713… 0,723**	**0,697… 0,720**	**+4…+8 %**

При базовой конфигурации расчётное время эвакуации меньше аналитического решения во всех расчётах: −234,5, −108,4, −89,2 и −36,0 с, или −38,5…−14,7 %. Расчёт даёт оценку снизу, и **вне допуска ±10 % четыре расчёта из четырёх**. При откалиброванной конфигурации в режиме УАМ отклонение составляет −6,3…−0,4 %, или −36,7…−0,9 с: **в допуске четыре расчёта из четырёх** на обеих постановках и при обоих наборах параметров. Оценка относится к двум рассмотренным постановкам гидравлической модели.



Аналитическое решение — гидравлическая модель первоисточника: управляющий элемент — дверь 32″ на лестницу, эффективная ширина 32″ − 2 × 6″, поток 0,671 чел/с на дверь.

Рисунок 193. Время эвакуации по двум примерам: аналитическое решение гидравлической модели, базовая конфигурация и откалиброванная в режиме УАМ, каждая при двух наборах параметров профиля. Предел базовой конфигурации 1,42 чел/(с·м) по методике и 1,32 по источнику. По оси ординат отложены секунды



Аналитическое решение — постоянный поток через управляющий элемент (две двери 32″, 0,671 чел/с каждая): в примере 2 первые 200 человек первого этажа уходят собственными боковыми выходами, дальше кривую задают лестницы.

Рисунок 194. Число вышедших по времени: аналитическое решение, базовая конфигурация и откалиброванная в режиме УАМ. По оси абсцисс отложены секунды, по оси ординат – люди, прошедшие через выходы

Результат определяет поток через управляющую дверь. В режиме УАМ он составляет 0,697…0,723 чел/с при аналитическом значении 0,671 чел/с. При базовой конфигурации предел этой двери равен 1,42 ·

0,813 = 1,154 чел/с, и расчётное время эвакуации получается меньше аналитического. Управляющий элемент обеих постановок – проём шириной менее 1,6 м, и в каждой из двух аналитических моделей для него действует особое правило. Записи этого правила разные. В гидравлической модели вычитаются два пограничных слоя, и по оставшейся ширине применяется постоянный удельный поток 0,671 чел/с. Ветвь [1, табл. П2.8] даёт 0,752 чел/с в режиме УАМ. Значения предела отличаются на +12 %, чем и объясняется согласование результатов. При базовой конфигурации для узкого проёма особой ветви нет вовсе. Влияние параметров движения второстепенно. При наборе методики (V_0 = 1,67 против 1,19 м/с) расчётное время эвакуации в режиме УАМ отличается от полученного с параметрами источника на −5,9 и −1,6 %, тогда как при базовой конфигурации уменьшается на 25,4 и 25,2 %.

Где две модели расходятся:

1. **Створы у маршей.** У сечения на марше нет ширины стены, от которой поток переформируется, поэтому в цепочку «сечение участка, переформирование потока, скопление» такой створ не входит. Предел для проёмов шириной менее 1,6 м на него распространяется.
2. **Скорость на марше.** Гидравлическая модель задаёт для лестницы собственные скорости и удельный поток по подступёнку и проступи, методика вводит множитель к V_0 профиля. Марши здесь управляющим элементом не служат, но при иной геометрии различие проявится в результате.
3. **Широкие створы.** Выход приёмного помещения примера 1, 9,14 м, для режима УАМ служит сечением участка, а не проёмом. Интенсивность на нём задаётся плотностью подошедшего потока. Сечение участка – второй ограничитель, из-за которого расчётное время эвакуации в этой постановке сходится с аналитическим (−0,4 %).
4. **Пограничный слой.** Ни в одном расчёте он не сужает створ: при базовой конфигурации и наборе гидравлической модели предел 1,32 чел/(с·м) умножается на полную ширину двери, а не на эффективную.

Невоспроизводимо то, чего нет в словесном описании постановок (Г13.1): размещение людей внутри помещений и ширина боковых выходов примера 2.

Г13.4 Выводы

Два примера гидравлической модели SFPE дают аналитическое решение, полученное вне отечественной нормативной базы. На них проверено то же свойство ядра, что и на задачах пособия: следует ли расчёт пределу потока, который зависит от ширины управляющего створа. При базовой конфигурации расчётное время эвакуации меньше аналитического решения во всех расчётах и в допуск не входит ни один: это оценка снизу, поскольку постоянный нормативный предел на узкой управляющей двери выше значения, которым пользуется гидравлическая модель. При откалиброванной конфигурации предел вычисляется по ширине створа в режиме УАМ и близок к значению гидравлической модели, и расчётное время эвакуации входит в допуск во всех расчётах при обоих наборах параметров движения. Совпадение достигается потому, что оба метода ограничивают поток через один и тот же управляющий створ, а различие в записи правила для узкого проёма невелико. Ограничение применения: в рассмотренных постановках расчёт с параметрами гидравлической модели расчётом пожарного риска по методике не служит, поскольку ни скорости свободного движения источника, ни его кривой «скорость–плотность», ни пограничного слоя, ни удельного потока створа в [1] нет.

Приложение Д. Сопоставление с Pathfinder по корпусу моделей

Д.1 Назначение

PF (Pathfinder, Thunderhead Engineering, США) – программа того же класса, применяемая в отечественной практике расчётов по индивидуально-поточной модели. Формат её входного файла и файлов результатов общий с форматом ядра FireEvac. Числа PF документ приводит только в этом приложении.

Сопоставление отвечает на два вопроса. Первый касается **совместимости формата**: читает ли ядро подготовленный для PF файл без изменений и пишет ли результаты тем же набором файлов. Второй касается **совместимости поведения**: отличается ли расчётное время эвакуации на моделях зданий от полученного в сложившейся практике расчётов и на каком механизме.

Верификацией и валидацией это сопоставление не служит: другая программа статуса источника не имеет, и ни одно утверждение о точности ядра на её числа не опирается. Расхождение с PF служит основанием для разбора механизма и, при расхождении в переносе формата, для изменения ядра.

Д.2 Корпус 105 моделей

Корпус составляют 105 моделей четырёх групп. В скобках даны начала имён в таблице ниже. Первая группа – учебные примеры формата и тесты отдельных механик: коридор, поворот, встречное движение, проём, лестничная клетка, пандус, ряд проёмов (`ex*`, `imo1`, `encounter`, `cornering`, `ramp`, `seyfried_tests`, `multi-floor-stairwell`). Во вторую входят пробные модели на собственной геометрии и серии по отдельным вопросам: двери заданной ширины, лестничные клетки на 1…80 человек, развилки, рампы. В ту же группу входят области измерения, сопровождение, зона безопасности, габарит проекции и поворот, начальные числа расстановки, касания. Имена этих моделей идут от `01-…` до `27-…` без номера 23 и далее `x-…`, `x33-…`, `p18-…`, `p24-…`, `p36-…`, `p41-…`, `p43-…`. Третью составляют проекты зданий по чертежам с расчётом пожарного риска: кинотеатр, аквапарк, жилая секция, учебный корпус на 1715 и актовый зал на 616 человек, административные здания, подземный комплекс (`кино_…`, `аквапарк1_…`, `секция5`, `модель_…`, `evac_…`, `эвак_…`). Четвёртая группа – тестовая модель пособия Академии ГПС на 5400 человек [10] (`тестовые расчеты`).

Модели разбиты на три накопительных уровня сложности; расхождение считается по относительному критерию (свыше 5 %) и по абсолютному (свыше 5 % и 5 с). Здесь Δ = (FireEvac − PF)/PF, а отрицательное Δ означает меньшее расчётное время эвакуации FireEvac. Знаменатель 210 складывается из 105 моделей по две величины. Сравнимых 208: для одной модели результатов PF нет, агентов в ней не задано.

В таблице 99 строк: пять моделей корпуса имеют вход, одинаковый с приведёнными выше, и повторно не выписаны. Модели одного имени из разных каталогов различены квалификатором в скобках.

Таблица 116. Корпус моделей: время завершения эвакуации FireEvac и PF на одних и тех же входных файлах

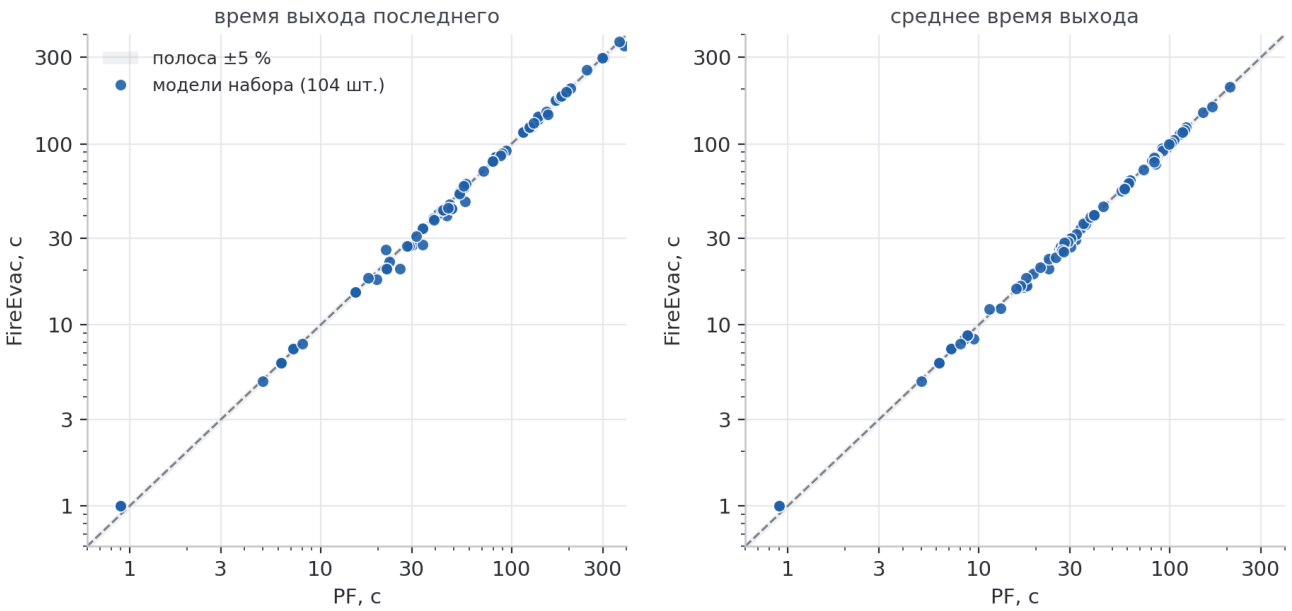
Модель	Вышло	Макс FireEvac	Макс PF	Δ	Среднее FireEvac	Среднее PF	Δ
encounter	2/2	1,0	0,9	+0,0 %	1,0	0,9	+0,0 %
imo1	1/1	34,2	34,2	+0,0 %	34,2	34,2	+0,0 %
ex1_st	47/47	46,4	47,5	−2,4 %	29,5	32,1	−8,1 %
ex1_st2	43/43	40,1	45,8	−12,4 %	27,1	30,4	−11,0 %
ex2_st	68/68	125,7	127,1	−1,1 %	87,5	88,6	−1,2 %
multi-floor-stairwell	125/125	123,7	127,2	−2,7 %	62,7	61,9	+1,4 %
cornering	1/1	7,4	7,2	+2,4 %	7,4	7,2	+2,4 %
seyfried_tests	600/600	84,8	82,6	+2,6 %	30,1	30,3	−0,7 %
ramp	20/20	17,9	19,6	−9,0 %	12,3	13,0	−5,0 %
ex1 (пять сценариев)	47/47	27,5	30,1	−8,7 %	16,2	17,2	−5,9 %
ex1_2	47/47	48,2	57,0	−15,4 %	20,4	23,3	−12,7 %
ex1_3	47/47	91,9	93,7	−1,9 %	19,2	19,2	−0,2 %
ex1_4	47/47	27,7	34,3	−19,1 %	16,8	17,7	−5,1 %
ex1_5	47/47	27,3	29,0	−5,7 %	16,5	17,8	−7,7 %
ex1 (простые здания)	47/47	136,6	139,0	−1,7 %	113,6	114,8	−1,0 %
ex2	96/96	189,8	190,8	−0,5 %	94,4	96,1	−1,8 %
кино_Сценарий 1. Зал 111	280/280	175,3	171,3	+2,3 %	81,0	80,5	+0,6 %
кино_Сценарий 2. Зал 119	280/280	174,3	170,3	+2,3 %	84,9	84,9	+0,0 %
кино_Сценарий 3. 2 этаж	280/280	191,9	191,6	+0,2 %	113,0	112,9	+0,0 %
секция5	171/171	664,4	668,3	−0,6 %	459,3	457,2	+0,5 %
аквапарк1_По умолчанию	1400/1400	256,5	248,0	+3,4 %	123,0	122,0	+0,9 %
аквапарк1_Сценарий 1. Аквапарк	550/550	297,1	304,2	−2,3 %	205,7	207,1	−0,6 %
тестовые расчеты	5400/5400	347,4	389,3	−10,8 %	77,1	84,4	−8,6 %
01-простая	50/50	44,1	48,6	−9,4 %	25,3	27,0	−6,3 %
02-лестница	40/40	41,3	41,3	−0,1 %	26,3	26,4	−0,4 %
03-зона-безопасности	50/50	15,2	15,2	−0,7 %	8,4	8,4	−0,3 %
04-области-измерения	100/100	80,5	79,6	+1,1 %	40,6	40,0	+1,5 %
05-средство-передвижения	25/29	20,5	26,1	−21,7 %	8,4	9,4	−10,3 %
06-сопровождение	22/22	26,0	21,9	+18,6 %	12,2	11,4	+7,2 %
07-дверь-0.9	150/150	120,2	121,2	−0,8 %	60,8	60,6	+0,3 %
08-дверь-0.9-поток-0.5	150/150	298,8	298,8	+0,0 %	149,8	149,8	+0,0 %
09-дверь-2.0	150/150	53,9	53,2	+1,2 %	27,1	27,0	+0,4 %
10-номинал-0.8	200/200	188,0	187,2	+0,4 %	94,6	95,4	−0,8 %
11-номинал-1.0	200/200	143,3	144,8	−1,0 %	72,3	72,7	−0,5 %
12-номинал-1.2	200/200	120,6	121,4	−0,7 %	60,9	61,1	−0,4 %
13-номинал-1.6	200/200	88,9	88,9	+0,1 %	45,1	44,9	+0,5 %
14-номинал-2.0	200/200	71,0	71,3	−0,4 %	36,0	36,2	−0,3 %

Модель	Вышло	Макс FireEvac	Макс PF	Δ	Среднее FireEvac	Среднее PF	Δ
15-развилка	60/60	57,7	56,6	+2,0 %	31,8	32,3	−1,5 %
16-развилка-сдвиг	60/60	53,2	53,5	−0,7 %	30,1	30,3	−0,6 %
17-развилка-дверь-закрыта	60/60	60,2	57,5	+4,7 %	36,3	35,2	+3,4 %
18-клетка-1	1/1	18,2	17,7	+3,1 %	18,2	17,7	+3,1 %
19-клетка-2	2/2	22,3	22,9	−2,8 %	20,9	21,0	−0,1 %
20-клетка-8	8/8	27,3	28,4	−3,8 %	23,2	23,2	+0,0 %
21-клетка-40	40/40	58,8	56,2	+4,6 %	39,4	38,5	+2,5 %
22-клетка-80	80/80	86,1	87,3	−1,4 %	55,2	55,8	−1,2 %
24-рампа-1-8	40/40	43,0	43,0	−0,2 %	28,8	28,6	+0,8 %
25-рампа-1-12	40/40	43,0	43,8	−1,9 %	28,8	29,4	−2,1 %
26-простая-crlf	50/50	44,1	48,6	−9,4 %	25,3	27,0	−6,3 %
27-простая-без-out	50/50	44,1	48,6	−9,4 %	25,3	27,0	−6,3 %
ex1 (копии моделей)	47/47	127,3	128,1	−0,6 %	104,9	105,2	−0,2 %
x-lowspeed-025	200/200	186,9	187,2	−0,2 %	94,3	95,4	−1,1 %
x-refuge-tpl-full	50/50	15,2	15,2	−0,7 %	8,4	8,4	−0,3 %
x-refuge-tpl-min	50/50	15,2	15,2	−0,7 %	8,4	8,4	−0,3 %
x33-requires-assist	22/22	20,5	22,1	−7,2 %	8,8	8,7	+1,8 %
x33-shape-cylinder	22/22	20,5	22,1	−7,2 %	8,8	8,7	+1,8 %
p18-corner-base	1/1	6,2	6,2	+0,0 %	6,2	6,2	+0,0 %
p18-corner-param-015	1/1	6,2	6,2	+0,0 %	6,2	6,2	+0,0 %
p18-corner-param-030	1/1	6,2	6,2	+0,0 %	6,2	6,2	+0,0 %
p18-corner-prof-015	1/1	7,4	7,2	+2,4 %	7,4	7,2	+2,4 %
p18-corner-prof-030	1/1	7,9	8,0	−0,9 %	7,9	8,0	−0,9 %
p18-door-base	200/200	188,0	187,2	+0,4 %	94,6	95,4	−0,8 %
p18-door-inf-base	200/200	116,3	114,6	+1,5 %	56,4	57,9	−2,6 %
p18-door-inf-param-015	200/200	116,3	114,6	+1,5 %	56,4	57,9	−2,6 %
p18-door-param-015	200/200	188,0	187,2	+0,4 %	94,6	95,4	−0,8 %
p18-door-param-030	200/200	188,0	187,2	+0,4 %	94,6	95,4	−0,8 %
p18-door-prof-015	200/200	186,4	180,8	+3,1 %	93,3	91,3	+2,2 %
p18-door-prof-030	200/200	183,1	180,7	+1,3 %	91,7	91,2	+0,5 %
p24-door-seed1	200/200	184,5	180,7	+2,1 %	93,0	91,0	+2,1 %
p24-door-seed2	200/200	179,5	179,7	−0,1 %	89,9	90,0	−0,2 %
p24-door-seed3	200/200	183,6	184,3	−0,4 %	91,8	92,8	−1,1 %
p24-door-seed4	200/200	185,7	181,5	+2,3 %	94,0	90,8	+3,6 %
p24-door-seed5	200/200	184,2	181,9	+1,2 %	94,0	91,4	+2,9 %
p24-door-seed6	200/200	182,9	182,5	+0,2 %	91,9	92,0	−0,2 %
p24-stair-same1	160/160	137,4	137,8	−0,3 %	83,7	84,3	−0,7 %
p24-stair-seed1	160/160	141,5	137,1	+3,3 %	85,5	83,8	+2,1 %
p24-stair-seed2	160/160	138,3	139,4	−0,8 %	83,2	85,0	−2,1 %
p24-stair-seed3	160/160	140,3	140,5	−0,1 %	83,9	85,4	−1,8 %
p24-stair-seed4	160/160	139,9	137,7	+1,6 %	82,5	84,0	−1,8 %
p24-stair-seed5	160/160	141,6	139,3	+1,6 %	84,3	84,4	−0,1 %
p24-stair-seed6	160/160	137,2	139,6	−1,7 %	81,5	83,9	−2,9 %

Модель	Вышло	Макс FireEvac	Макс PF	Δ	Среднее FireEvac	Среднее PF	Δ
p24-stair-seed7	160/160	139,7	138,3	+1,0 %	83,7	83,6	+0,1 %
p24-stair-seed8	160/160	136,9	137,4	−0,4 %	82,3	83,7	−1,7 %
p24-stair-seed9	160/160	141,9	137,0	+3,6 %	83,9	83,2	+0,8 %
p36-client-fast	22/22	38,6	39,0	−1,1 %	23,7	25,4	−6,9 %
p36-equal	22/22	31,0	31,6	−2,1 %	16,5	16,6	−0,7 %
p36-helper-fast	22/22	37,9	39,3	−3,6 %	15,9	15,7	+1,4 %
p41-avoid	50/50	123,9	124,0	−0,1 %	27,3	27,8	−1,7 %
p41-collisions	50/50	124,0	124,0	+0,0 %	28,4	28,1	+1,3 %
p41-nocollisions	50/50	124,0	124,0	+0,0 %	25,8	27,3	−5,5 %
p43-regions-edge	100/100	80,5	79,6	+1,1 %	40,6	40,0	+1,5 %
p43-regions-in	100/100	80,5	79,6	+1,1 %	40,6	40,0	+1,5 %
ex1 (с областями измерения)	47/47	44,4	46,6	−4,8 %	25,3	27,8	−9,0 %
evac_Сценарий 1	276/276	151,1	151,8	−0,5 %	118,9	119,3	−0,4 %
evac_Сценарий 4	163/163	129,9	130,8	−0,7 %	115,9	116,3	−0,3 %
модель_3 этаж	1715/1715	367,5	367,5	+0,0 %	161,0	166,7	−3,4 %
модель_Актовый зал	616/616	145,0	154,8	−6,4 %	79,8	82,7	−3,4 %
эвак_Сценарий 1 Пожар в пож секции 3	268/268	202,6	204,2	−0,8 %	101,6	102,0	−0,4 %
эвак_Сценарий 3 Пожар в пож секции 1	268/268	193,5	194,0	−0,3 %	100,0	99,5	+0,5 %
test	1/1	4,9	5,0	−1,0 %	4,9	5,0	−1,0 %

Времена округлены до 0,1 с, отклонения Δ вычислены по неокруглённым значениям.

Корпус моделей: FireEvac против PF (диагональ 1:1, полоса ±5 %)



Источник данных: верификация/документ/заметки/сжатие-проходной-17-09-данные/линия-ступень-3-полно-6d18def6.log (ядро md5 6d18def6)

Рисунок 195. Корпус моделей: выход последнего человека и среднее время завершения эвакуации, FireEvac против PF. Логарифмические шкалы, диагональ 1:1, полоса ±5 %

Приложение E. Параметры ядра

Расчётчик управляет результатом через ключи профиля, поля объектов модели, секцию `[param]`, командную строку и переменные окружения. В графе «По умолчанию» стоит значение при отсутствии ключа, а где редактор модели пишет другое, приведены оба.

Таблица 117. Параметры ядра

Параметр	Где задаётся	Единицы	По умолчанию	Смысл и назначение
`MAXVEL`	профиль	м/с	1,19; в профилях библиотеки – по таблицам методики	скорость свободного движения на горизонтальном пути – по контингенту и категории условий движения
`SHAPE`	профиль	индекс записи `[occshapes]`	запись 0	ссылка профиля на форму проекции – площадь проекции профиля
`diameter` записи `[occshapes]`	`[occshapes]`	м	0,4558	диаметр проекции – равновеликий круг площади f (таблица методики либо замер опыта)
`geomdiameter` записи `[occshapes]`	`[occshapes]`	м	равен `diameter`	проходной диаметр – непересекающаяся часть проекции; проходимость узких мест
`type poly N x y z …` записи `[occshapes]`	`[occshapes]`	м	круг	многоугольная проекция: габарит кресла-коляски или носилок
`height` записи `[occshapes]`	`[occshapes]`	м	1,8	высота; на плоское движение не влияет
`ACCEL_TIME`	профиль	с	1,1; в профилях библиотеки 1,5 у групп М0 и М1, 2,5…3,5 у групп МГН	время выхода на скорость свободного движения; от него зависит и дистанция торможения, которую агент держит до идущего впереди; в профиле курсанта (Г9) принято значение по умолчанию 1,1 с
`INIT_ORIENT`	профиль либо `[occupants]`	° (либо `rad`)	случайно, по начальному числу	начальный разворот корпуса, в том числе средств передвижения

Параметр	Где задаётся	Единицы	По умолчанию	Смысл и назначение
`loc` записи `[occupants]`	`[occupants]`	м	–	точка расстановки, по которой строится расчётная схема
`profile` записи `[occupants]`	`[occupants]`	индекс	–	какой профиль назначен – состав людей на объекте
`behavior` записи `[occupants]`	`[occupants]`	индекс	–	какой скрипт поведения назначен – сценарий эвакуации
`rseed` записи `[occupants]`	`[occupants]`	целое	0	начальное число генератора индивидуальных величин – разброс скоростей и времён начала эвакуации
`orientSeed` записи `[occupants]`	`[occupants]`	целое	равен `rseed`	отдельное начальное число для разворота
`count` в строке `[nodes]`	объект помещения	чел	без предела	предельное число агентов при расстановке
`dens` в строке `[nodes]`	объект помещения	чел/м²	без предела	предельная плотность расстановки – не выше той, при которой проекции размещаются
`wait <c>`, `wait curve <n>` в скрипте `[behaviors]`	сценарий поведения	с	задержки нет	время начала эвакуации агента: $t_{нэ}$ по расчётной схеме
`--начало-эвакуации <c>`, кратко `--нэ`	`fse run`	с	не задан: вход не изменяется	подстановка одного времени начала эвакуации во все задержки поведений – пересчёт готовой модели на другое $t_{нэ}$
`FUNDAMENTAL`	профиль	таблица «плотность, чел/м² → доля V_0»	встроенная: 0,55 → 1,0; 3,28 → 0,15	кривая «скорость–плотность» горизонтального пути: формула методики либо кривая, измеренная в опыте

Параметр	Где задаётся	Единицы	По умолчанию	Смысл и назначение
`set_speed_mod` с типом `FACTOR`, `LIMIT` или `CONSTANT`	`[events]`	доля либо м/с	не задан	множитель, предел или постоянная скорость на участке – зона замедления, движущееся полотно
`[blockages]` и команды `add_blockage`, `remove_blockage`, `set_blockage_speed_mod`	объект модели, `[events]`	– либо доля	нет	препятствие поверх сетки: перекрытие или замедление треугольников по сценарию
`[measurement-regions]` : `pts`, `min` / `max`, `floor`, `enabled`	объект модели	м	областей нет	области замера плотности и скорости – там же, где их измеряли в опыте
`measurement_region_seekspeed`	`[param]`	0/1	1	в области замера брать скорость вдоль пути, а не полную – по определению источника
`dt_csv_data`	`[param]`	с	0,5	шаг записи рядов в файлы результатов – по частоте съёмки опыта
`local_speed_avg_time`	`[param]`	с	2,0	окно осреднения локальной скорости агента – признак «стоит в очереди»
`low_speed_threshold`	`[param]`	м/с	0,25 (то же значение пишет редактор модели)	порог, ниже которого агент и его сосед считаются неподвижными, – граница скопления
`low_speed_averaging_time`	`[param]`	с	10,0	окно осреднения для этого порога
`PROP_SPACING`	профиль	чел/м² (`DENSITY`), м²/чел (`AREA`), м (`COMFORT_DIST`, `DISTANCE`)	0,08 м при отсутствии ключа	персональная дистанция – просвет между поверхностями проекций; шаг однорядной очереди и плотность скопления

Параметр	Где задаётся	Единицы	По умолчанию	Смысл и назначение
`BOUNDARY_LAYER`	профиль	м	0,15; в профилях методики 0 – правило не действует	толщина слоя у стены, в котором направление шага получает штраф; ширину створа не уменьшает, на лестницах и пандусах не действует
`PERSIST_TIME`	профиль	с	1,0	время удержания права прохода – разбор встречных пар и узких мест
`COLLISION_RESPONSE_TIME`	профиль	с	1,5	горизонт реакции на сближение – дистанция начала уклонения
`SLOW_FACTOR`	профиль	доля V_0	0,1	предел скорости шага не к цели и порог «медленного» соседа – отход в сторону и назад
`REAC_TIME`	профиль	с	0,1	шаг пересмотра направления; наименьшее значение по агентам – интервал рулевого управления
`PRIORITY_LEVEL`	профиль	уровень – целая часть; разрешение равенства – дробная	0	очерёдность уступки при встрече – преимущество сопровождающим, персоналу
`handle_collisions`	`[param]`	0/1	1	учитывать касания соседей в плотном потоке
`social_distance_value`	`[param]`	м	2,0	радиус социальной дистанции модели
`PROP_SOCIAL_DIST`	профиль	м	не задано: дистанция отключена	персональная социальная дистанция профиля
`PROP_SOCIAL_DIST_FILTER`	профиль	имя правила	`AlwaysFalse`	к кому социальная дистанция применяется

Параметр	Где задаётся	Единицы	По умолчанию	Смысл и назначение
наличие объекта «дверь» на границе участков	строка `[doors]`: узел, ширина, стороны А и Б	–	по построению модели	есть ли на границе створ, к которому применяется предел потока: предел действует только на створе
`specific_flowrate_max` при оформлении границы створом	`[param]`	чел/(с·м)	как у `specific_flowrate_max`	предел задаётся по виду пути, а не по проёму: $q_{Dmax}/(60 \cdot f)$ – сведение задач слияния к аналитическому решению пособия
`PRIORITY_LEVEL` в месте слияния	профиль	уровень	0	очерёдность прохода при сходе двух потоков
`specific_flowrate_max`	`[param]`	чел/(с·м) – умножается на ширину створа	предела нет; редактор модели пишет 1,42	предел удельного потока через створ: табличное значение, замер опыта либо снятие ограничения
ширина створа	строка `[doors]`	м	–	ширина проёма; предельный поток равен произведению предела на ширину, ширина во входном файле задана эффективной
направление `dir+`, `dir-`	строка `[doors]`	–	проход в обе стороны	односторонний проход через створ
время ожидания у двери – индекс кривой	строка `[doors]`	с	нет	задержка перед проходом створа – турникет, проверка, запирание
`--doors-1140`, то же `FSE_DOORS_1140=1`	`fse run`	–	выключен	режим УАМ: предел каждого створа вычисляется по ходу расчёта (раздел 2.6)
`door_queue_update_interval`	`[param]`	с	0,1	период пересчёта наблюдаемого расхода створа и состава очередей

Параметр	Где задаётся	Единицы	По умолчанию	Смысл и назначение
`SPEED_STAIR_UP`, `SPEED_STAIR_DOWN`	профиль	доля V_0 – число либо таблица «уклон → доля»	встроенная кривая уклона	доля горизонтальной скорости свободного движения на марше: скорость марша – произведение `MAXVEL` на эту долю; в профилях библиотеки методики – число, равное отношению скоростей табл. П2.6 для лестницы и горизонтального пути (у М0-3 1,0 вниз и 0,6 вверх), от уклона не зависит; таблица «уклон → доля» – только встроенное значение для профилей без ключа
`SPEED_RAMP_UP`, `SPEED_RAMP_DOWN`	профиль	доля V_0	1,0	то же для пандуса, отдельно от горизонтального пути
`FUNDAMENTAL_STAIR_UP`, `FUNDAMENTAL_STAIR_DOWN`	профиль	таблица «плотность → доля V_0»	кривая горизонтального пути	кривая «скорость–плотность» марша по коэффициентам таблиц методики
`FUNDAMENTAL_RAMP_UP`, `FUNDAMENTAL_RAMP_DOWN`	профиль	таблица «плотность → доля V_0»	кривая горизонтального пути	то же для пандуса
подступёнок и проступь	строка `[stairs]`	м	из трёхмерной геометрии узла	уклон марша числом, а не трёхмерной геометрией
`ESCALATOR_PREF`	профиль	`STAND_ANYWHERE`, `STAND_LEFT`, `STAND_RIGHT`, `WALK`	`STAND_ANYWHERE`	поведение на движущемся полотне
`CURR_DOOR_PREF`	профиль	доля	множитель 0,35 при отсутствии ключа	предпочтение ранее выбранной двери при пересмотре решения

Параметр	Где задаётся	Единицы	По умолчанию	Смысл и назначение
`DIST_TRAVELLED_DOUBLE_DIST`	профиль	м	35	путь по помещению, на котором надбавка за возврат удваивается
`LOCAL_QUEUE_TIME_FACTOR`	профиль	вес	1,0	вес оценки времени в очереди у створа
`LOCAL_TRAVEL_TIME_FACTOR`	профиль	вес	1,0	вес оценки времени хода до створа
`TAIL_TIME_FACTOR`	профиль	вес	1,0	вес оценки замыкающей части пути за створом
`min_flowrate_factor`	`[param]`	доля номинального потока	0,1; 0 – без границы	нижняя граница наблюдаемого расхода створа при оценке очереди
`goto exit any`, `goto exit <узлы>`, `goto room <n>`, `goto point (x, y, z) <радиус>`	`[behaviors]`	–	`goto exit any`	цель агента: любой выход, назначенный выход, помещение, путевая точка
`wait_until`, `wait_until_end`	`[behaviors]`	с	нет	ожидание до абсолютного времени либо до конца расчёта
`tag`, `untag`, `set_tag`, `fill_room`, `fill_room_if_necessary`	`[behaviors]`	–	нет	пометки агентов и заполнение помещения
`close_door`, `open_door`, `change_door_dir`	`[events]`	с	нет	изменение доступности створа по ходу расчёта, не ранее 0,1 с
`RESTRICTED_COMPONENTS` и `[component-restrictions]`	профиль, объект модели	–	ограничений нет	запрет профилю пользоваться перечисленными помещениями и створами
`path_cleanup`	`[param]`	`DISABLED`, `ALWAYS`, `IF_NECESSARY`	`IF_NECESSARY`	выпрямление построенного маршрута внутри помещения либо маршрут по рёбрам сетки
`REQUIRES_ASSISTANCE`	профиль	0/1	0	признак немобильности: агент не передвигается сам

Параметр	Где задаётся	Единицы	По умолчанию	Смысл и назначение
`attachedAgentsPositions` записи `[occshapes]`	`[occshapes]`	м	нет	места сопровождающих у средства транспортировки
`[assisted-evac-teams]` : `id`, `goals`	объект модели	–	команд нет	состав команд сопровождения и порядок их целей
`assist <команда> [режим] [радиус] [помещения]`	`[behaviors]`	м	радиус не ограничен	поведение сопровождающего: за каким агентом закреплён и в какой зоне его ищет
`get_assistance <команды>`	`[behaviors]`	–	нет	поведение НМ: какие команды его сопровождают
`detach_assistants`	`[behaviors]`	–	нет	отцепление сопровождающих в заданной точке сценария
`dt_init`	`[param]`	с	0,025	шаг расчёта – проверка независимости результата от шага
`max_time`	`[param]`	с	3600; 0 – без предела	предел модельного времени; прерывание незавершаемого расчёта
`scenario`	`[param]`	–	без имени	имя сценария в файлах результатов
`occ_csv_file_as_one`	`[param]`	0/1	1	один файл результатов вместо файла на агента
`social_distance_csv_output`	`[param]`	0/1	0	выводить социальную дистанцию в файлы результатов
`PRINT_EXTRA_OUTPUT`	профиль	0/1	0	подробная выдача по агентам этого профиля
`--traj`	`fse run`	–	выключен	запись подробной траектории – след для проверки механики движения

Параметр	Где задаётся	Единицы	По умолчанию	Смысл и назначение
`--pf-out`, `--pf-names`	`fse run`	–	выключены	расширенный состав и другие имена файлов результатов – рядом с исходной моделью
подкоманды `fse`: `run`, `inspect`, `fundtest`, `doortest`, `stairtest`, `compare`, `densmap`, `tuning`	командная строка	–	–	расчёт, разбор входного файла, встроенные проверки исполняемого файла, карта плотности, печать калибровочных значений
`FSE_D1140_OLD=1`	окружение	–	выключено	при `--doors-1140` возвращает прежнее правило: ограничение табл. П2.8 только на створах шириной менее 1,6 м; воспроизведение расчётов, сделанных до появления режима УАМ
`FSE_D1140_R`, `_DUP`, `_TAU`, `_EMA`, `_DFLOOR`, `_DSEC`, `_QMAX`	окружение	м; м²/м²; с; с; м²/м²; м²/м²; м/мин	1,5; 0,5; 1,0; 0,5; 0,1; 0,25; 19,6	настроечные величины режима УАМ: радиус зоны перед створом, порог плотности зоны, выдержка, сглаживание, нижняя граница плотности формирования, нижняя граница сечения участка, верхняя граница интенсивности проёма; приняты разработчиком ядра, в расчётах документа не менялись

Параметр	Где задаётся	Единицы	По умолчанию	Смысл и назначение
`FSE_MAX_TIME=<c>`, `FSE_WARP="<файл результатов>:<t>"`	окружение	с	не заданы	предел модельного времени поверх ключа модели; продолжение расчёта с состояния на момент t из файла результатов; служебные, в расчётах пожарного риска не применяются

Приложение Ж. Архив моделей тестов

С программой поставляется архив `FireEvac-модели-ВВ.zip`, в котором собраны все расчётные модели, давшие числа приложений Г1…Г13: 1 652 файла формата `.txt`, по одному на расчёт, в тринадцати каталогах по приложениям (`Г01-iso`, `Г02-методика`, … `Г13-sfpe`). Модель самодостаточна: профиль группы мобильности, кривые «скорость–плотность», расчётная сетка, расстановка людей и предел потока проёма записаны в самом файле, поэтому внешних данных для расчёта не требуется.

Одна модель считается командой `fse run <файл>`. Где откалиброванная конфигурация отличается от базовой не моделью, а положением переключателя, к той же команде добавляется ключ `--doors-1140` (режим УАМ); это указано в строке теста. В остальных случаях каждой конфигурации отвечает свой файл, и это видно по имени: `_базовая` и `_откалиброванная`. Суффикс `_pN` означает номер расстановки (начальное число генератора), `_runN` – то же в тестах ISO 20414. В приложенииГ11 одна модель может отвечать двум точкам таблицы, поэтому сумма по строкам там больше числа файлов каталога.

Таблица 118. Тесты документа и файлы моделей в архиве

Приложение, тест	Файлы моделей	Файлов
Г1. Тест 1. Назначение времени начала эвакуации	`тест01_{равномерное,нормальное,логнормальное}_run{1,2,3,4,5}.txt`	15
Г1. Тест 2. Скорость свободного движения в коридоре	`тест02_угол{00,45}_a{00,15}.txt`	4
Г1. Тест 3. Скорость движения по лестнице	`тест03_вверх.txt`, `тест03_вниз.txt`	2
Г1. Тест 4. Движение за угол	`тест04_run{1,2,3,4,5}.txt`	5
Г1. Тест 5. Назначение характеристик населения	`тест05_{равномерное,нормальное,логнормальное}_run{1,2,3,4,5}.txt`	15
Г1. Тест 6. Встречные потоки	`тест06_встр{000,010,050,100}_run{1,2,3,4,5}.txt`	20
Г1. Тест 7. Обгон человека с ограниченной подвижностью	`тест07_сц1_МГН_run{1,2,3,4,5}.txt`, `тест07_сц2_обычный_run{1,2,3,4,5}.txt`	10
Г1. Тест 8. Назначение выхода	`тест08_ближайший.txt`, `тест08_назначенный.txt`	2
Г1. Тест 9. Динамическая доступность выхода	`тест09_Exit1_открыт.txt`, `тест09_Exit1_закрывается.txt`	2
Г1. Тест 10. Скопление перед лестницей	`тест10_run{1,2,3,4,5}.txt`	5
Г1. Тест 11. Наибольший поток через проём	`тест11_кап1.42_run{1,2,3,4,5}.txt`, `тест11_безкапа_run{1,2,3,4,5}.txt`; откалиброванная конфигурация – те же файлы с ключом `--doors-1140`	10
Г1. Тест 12. Потоки по лестнице	`тест12_{вверх,вниз}_w{10,12,14,16,18}_run{1,2,3}.txt`	30
Г1. Тест 13. Связь потока, плотности и скорости в коридоре	`тест13_N{060,120,240,360,480}.txt`	5

Приложение, тест	Файлы моделей	Файлов
Г1. Тест 17. Выбор маршрута по геометрии	`тест17_смещ{02,04,06}.txt`	3
Г2. Скорость свободного движения по профилям	`скорость-<профиль>-{гор-20м,гор-60м,вниз-6м,вниз-18м,вверх-6м,вверх-18м}.txt` – 27 профилей библиотеки	162
Г2. Порог свободного движения и кривая профиля	отдельных моделей нет: табулированные кривые читаются из тех же 162 файлов	–
Г2. Площадь, габариты проекции и проходимость узких мест	`проход-<профиль>-b{030,040,050,055,060,065,070,075,080,090,100,120}.txt` – 5 профилей	60
Г2. Предел интенсивности через проём	`предел-проёма-предел-1.42-b{080,100,120,140,160,200}.txt`, `предел-проёма-без-предела-b{080,100,120,140,160,200}.txt`; откалиброванная конфигурация – файлы `предел-1.42` с ключом `--doors-1140`	12
Г2. Кривая «скорость–плотность»: встроенный замер	`встроенный-замер-профили.txt`, `встроенный-замер-M0-3.txt`	2
Г2. Кривая «скорость–плотность»: коридор 3 × 50 м	`фд-летн-D{00.5,01.0,01.5,02.0,02.5,03.0,03.5,04.0,04.5,05.0}.txt`, `фд-z155-D{00.5,01.0,01.5,02.0,02.5,03.0,03.5,04.0,04.5,05.0}.txt`	20
Г2. Кривая «скорость–плотность»: свободный пакет, коридор после проёма, очередь	`очередь-{A,B,C,D,E,F}-*.txt`	20
Г2. Кривая «скорость–плотность»: открытый коридор 2 × 200 м	`коридор200-гекс-D{1,2,3,4,5}.txt`, `коридор200-случ-D{1,2,3,4}.txt`	9
Г2. Потоки через двери, марши и коридоры	`дверь-{0.70,0.90,1.10,1.40,1.70,2.00,2.50,3.00}.txt`, `лестн-{0.70,0.90,1.10,1.40,1.70,2.00,2.50,3.00}.txt`, `корид-<ширина>-пл<плечо>.txt`	31
Г3. Задачи 1-2… 9-2, торец 2,0 м	`задача-{01,02,03,04,05,06,07,08,09}-2_b20_p{1,2,3}.txt`	27
Г3. Задачи 10-2… 18-2, проём 1,2 м	`задача-{10,11,12,13,14,15,16,17,18}-2_b12_p{1,2,3}.txt`	27
Г3. Задачи 19-2… 27-2, проём 0,8 м	`задача-{19,20,21,22,23,24,25,26,27}-2_b08_p{1,2,3}.txt`	27

Приложение, тест	Файлы моделей	Файлов
Г3. Откалиброванная конфигурация всех 27 задач	те же 81 файл с ключом `--doors-1140`	–
Г4. Задачи 28-2…42-2, базовая конфигурация	`задача-{28,29,30,31,32,33,34,35,36,37,38,39,40,41,42}-2_базовая_p{1,2,3}.txt`	45
Г4. Задачи 28-2…42-2, откалиброванная конфигурация	`задача-{28,29,30,31,32,33,34,35,36,37,38,39,40,41,42}-2_откалиброванная_p{1,2,3}.txt`	45
Г5. Тест IMO 9, шаг 1: четыре двери	`imo09-4дв_p{1,2}.txt`	2
Г5. Тест IMO 9, шаг 2: две двери	`imo09-2дв_p{1,2}.txt`	2
Г6. Казарма Дюссельдорф 2006, 13 опытов	`казарма-b{090,100,110,120,140,160,180,200,220,250}_{базовая,откалиброванная}_p{1,2,3,4,5}.txt` (проём b, длина 4 м) и `казарма-l{0,2,4}_{базовая,откалиброванная}_p{1,2,3,4,5}.txt` (b = 1,2 м, длина 0,06 / 2 / 4 м)	130
Г6. Коридор Jülich 2009, 28 постановок	`коридор-<вход>-<коридор>-<выход>_{базовая,откалиброванная}_p{1,2,3,4,5}.txt`, ширины в сантиметрах: 050-180-180, 060-180-180, 065-240-240, 070-180-180, 080-240-240, 080-300-300, 095-240-240, 100-180-180, 100-300-300, 120-300-300, 145-180-180, 145-240-240, 180-180-070, 180-180-095, 180-180-120, 180-180-180, 180-300-300, 190-240-240, 240-240-100, 240-240-130, 240-240-160, 240-240-240, 240-300-300, 300-300-080, 300-300-120, 300-300-160, 300-300-200, 300-300-300	280
Г7. Ряд Зайфрида 2005, 15 опытов	`seyfried2009-b{080,090,100,110,120}N{20,40,60}_{базовая,откалиброванная}_p{1,2,3}.txt`	90
Г7. Ряд Кретца 2006, 7 ширин	`kretz2006-b{040,050,060,070,080,100,120}_{базовая,откалиброванная}_p{1,2,3}.txt`	42
Г7. Обобщённая линия серии, 8 ширин	`линия19-b{070,100,150,200,250,300,400,500}_{базовая,откалиброванная}_p{1,2,3}.txt`	48
Г8. Короткий проём, b = 1,2 м	`корпроём-b120_{базовая,откалиброванная}_p{1,2,3,4,5}.txt`	10
Г8. Короткий проём, b = 2,4 м	`корпроём-b240_{базовая,откалиброванная}_p{1,2,3,4,5}.txt`	10
Г8. Длинное сужение, b = 1,2 м	`длсужение-b120_{базовая,откалиброванная}_p{1,2,3,4,5}.txt`	10
Г8. Длинное сужение, b = 2,4 м	`длсужение-b240_{базовая,откалиброванная}_p{1,2,3,4,5}.txt`	10
Г8. Т-образное слияние, b = 2,4 м	`тройник-b240_{базовая,откалиброванная}_p{1,2,3,4,5}.txt`	10
Г8. Поворот 90°, b = 2,4 м	`поворот-b240_{базовая,откалиброванная}_p{1,2,3,4,5}.txt`	10
Г8. Поворот 90°, b = 3,0 м	`поворот-b300_{базовая,откалиброванная}_p{1,2,3,4,5}.txt`	10

Приложение, тест	Файлы моделей	Файлов
Г9. Опыт 1, коридор 20 × 2 м, случай 2.3.1	`коридор-2.3.1_{базовая,откалиброванная}_p{1,2,3,4,5,6,7,8,9,10}.txt`	20
Г9. Опыт 1, коридор 20 × 2 м, случай 2.3.2	`коридор-2.3.2_{базовая,откалиброванная}_p{1,2,3,4,5,6,7,8,9,10}.txt`	20
Г9. Опыт 1, коридор 20 × 2 м, случай 2.3.3	`коридор-2.3.3_{базовая,откалиброванная}_p{1,2,3,4,5,6,7,8,9,10}.txt`	20
Г9. Опыт 2, комната 2 × 2 м, проём 0,88 м, N = 4	`комната-N04_{базовая,откалиброванная}_p{1,2,3,4,5,6,7,8,9,10}.txt`	20
Г9. Опыт 2, N = 8	`комната-N08_{базовая,откалиброванная}_p{1,2,3,4,5,6,7,8,9,10}.txt`	20
Г9. Опыт 2, N = 12	`комната-N12_{базовая,откалиброванная}_p{1,2,3,4,5,6,7,8,9,10}.txt`	20
Г9. Опыт 2, N = 16	`комната-N16_{базовая,откалиброванная}_p{1,2,3,4,5,6,7,8,9,10}.txt`	20
Г9. Опыт 2, N = 20	`комната-N20_{базовая,откалиброванная}_p{1,2,3,4,5,6,7,8,9,10}.txt`	20
Г9. Опыт 2, N = 26	`комната-N26_{базовая,откалиброванная}_p{1,2,3,4,5,6,7,8,9,10}.txt`	20
Г9. Опыт 2, N = 31	`комната-N31_{базовая,откалиброванная}_p{1,2,3,4,5,6,7,8,9,10}.txt`	20
Г9. Опыт 2, N = 35	`комната-N35_{базовая,откалиброванная}_p{1,2,3,4,5,6,7,8,9,10}.txt`	20
Г9. Опыт 3, коридор 2 × 6 м, проём 0,8 м, летняя серия	`проём08-лето_{базовая,откалиброванная}_p{1,2,3,4,5,6,7,8,9,10}.txt`	20
Г9. Опыт 3, зимняя серия	`проём08-зима_{базовая,откалиброванная}_p{1,2,3,4,5,6,7,8,9,10}.txt`	20
Г10. Лестничная клетка 4-A	`клетка-4-A_{базовая,откалиброванная}_p{1,2,3}.txt`	6
Г10. Лестничная клетка 4-B	`клетка-4-B_{базовая,откалиброванная}_p{1,2,3}.txt`	6
Г10. Лестничная клетка 5-A	`клетка-5-A_{базовая,откалиброванная}_p{1,2,3}.txt`	6
Г10. Лестничная клетка 5-B	`клетка-5-B_{базовая,откалиброванная}_p{1,2,3}.txt`	6
Г10. Лестничная клетка 7-1	`клетка-7-1_{базовая,откалиброванная}_p{1,2,3}.txt`	6
Г10. Лестничная клетка 7-3	`клетка-7-3_{базовая,откалиброванная}_p{1,2,3}.txt`	6
Г10. Лестничная клетка 7-7	`клетка-7-7_{базовая,откалиброванная}_p{1,2,3}.txt`	6
Г10. Лестничная клетка 7-12	`клетка-7-12_{базовая,откалиброванная}_p{1,2,3}.txt`	6
Г10. Лестничная клетка 8-N	`клетка-8-N_{базовая,откалиброванная}_p{1,2,3}.txt`	6
Г10. Лестничная клетка 8-S	`клетка-8-S_{базовая,откалиброванная}_p{1,2,3}.txt`	6
Г11. Милинский, b = 0,7 м	`проём-b0.70_M0-3летн_предел-1.42.txt`, `проём-b0.70_M0-3летн_предел-1.796.txt`	2

Приложение, тест	Файлы моделей	Файлов
Г11. Милинский, b = 0,8 м	`проём-b0.80_M0-3летн_предел-1.42.txt`, `проём-b0.80_M0-3летн_предел-1.796.txt`	2
Г11. Милинский, b = 1,2 м	`проём-b1.20_M0-3летн_предел-1.42.txt`, `проём-b1.20_M0-3летн_предел-1.796.txt`	2
Г11. Милинский, b = 1,4 м	`проём-b1.40_M0-3летн_предел-1.42.txt`, `проём-b1.40_M0-3летн_предел-1.796.txt`	2
Г11. Милинский, b = 1,8 м	`проём-b1.80_M0-3летн_предел-1.42.txt`, `проём-b1.80_M0-3летн_предел-1.796.txt`	2
Г11. Милинский, b = 2,0 м	`проём-b2.00_M0-3летн_предел-1.42.txt`, `проём-b2.00_M0-3летн_предел-1.796.txt`	2
Г11. Копылов, метрополитен, b = 0,8 м	`проём-b0.80_M0-3зимн_предел-1.42.txt`, `проём-b0.80_M0-3зимн_предел-1.796.txt`	2
Г11. Копылов, универмаг, b = 0,8 м	те же два файла, что в строке выше	2
Г11. Копылов, универмаг, b = 1,8 м	`проём-b1.80_M0-3зимн_предел-1.42.txt`, `проём-b1.80_M0-3зимн_предел-1.796.txt`	2
Г11. Копылов, метрополитен, b = 2,5 м	`проём-b2.50_M0-3зимн_предел-1.42.txt`, `проём-b2.50_M0-3зимн_предел-1.796.txt`	2
Г11. Копылов, манеж, b = 0,8 м	`проём-b0.80_M0-3летн_предел-1.42.txt`, `проём-b0.80_M0-2летн_без-предела.txt`	2
Г11. Копылов, манеж, b = 1,2 м	`проём-b1.20_M0-3летн_предел-1.42.txt`, `проём-b1.20_M0-2летн_без-предела.txt`	2
Г11. Копылов, манеж, b = 1,4 м	`проём-b1.40_M0-3летн_предел-1.42.txt`, `проём-b1.40_M0-2летн_без-предела.txt`	2
Г11. Копылов, манеж, b = 1,6 м	`проём-b1.60_M0-3летн_предел-1.42.txt`, `проём-b1.60_M0-2летн_без-предела.txt`	2
Г11. Тарасова, b = 0,95 м	`проём-b0.95_M0-5зимн_предел-1.42.txt`, `проём-b0.95_M0-5зимн_без-предела.txt`	2
Г12. Проём b = 1,2 м по профилям групп M0-3, M1, M2, M3, M4	`проём-b1.2_{M0-3летн,M1-пожилые,M1-глухие,M2-немощные,M2-слепые,M3-одна-опора,M3-две-опоры,M4-коляска}_предел-1.42.txt`	8
Г12. Проём b = 1,2 м, M1 глухие и M2 слепые при измеренном пределе и без предела	`проём-b1.2_M1-глухие_{без-предела,предел-натурный,предел-натурный-на-двери}.txt`, `проём-b1.2_M2-слепые_{без-предела,предел-натурный}.txt`, `проём-b1.2_M0-3летн_предел-1.42-на-двери.txt`	6
Г12. Проём b = 1,2 м, ОДА с двумя опорами по табл. 3.5 источника	`проём-b1.2_ОДА-две-опоры_{предел-1.42,без-предела}.txt`	2

Приложение, тест	Файлы моделей	Файлов
Г12. Кресло-коляска М4, коридор 1,8 × 40 м, три плотности	`коридор-коляски-D{0.25,0.50,0.75}_предел-1.42.txt`	3
Г12. То же по кривой табл. 3.7 источника	`коридор-коляски-табл3.7-D{0.25,0.50,0.75}_предел-1.42.txt`	3
Г12. Кривая «скорость–плотность», встроенный замер	`встроенный-замер-МГН.txt`, `встроенный-замер-ОДА-две-опоры.txt`	2
Г13. Пример 1 гидравлической модели	`sfpe1-sfpe.txt` (параметры источника), `sfpe1-1140.txt` (профиль М0-3); откалиброванная конфигурация – те же файлы с ключом `--doors-1140`	2
Г13. Пример 2 гидравлической модели	`sfpe2-sfpe.txt`, `sfpe2-1140.txt`; откалиброванная конфигурация – те же файлы с ключом `--doors-1140`	2

Список литературы

1.	Об утверждении методики определения расчётных величин пожарного риска в зданиях, сооружениях и пожарных отсеках различных классов функциональной пожарной опасности : приказ МЧС России от 14 нояб. 2022 г. № 1140 : зарег. в Минюсте России 20 марта 2023 г. № 72633 : введён в действие с 1 сент. 2023 г. – Приложения № 2, 4–8. – URL: http://publication.pravo.gov.ru/Document/View/0001202303210005 (дата обращения: 14.09.2026).
2.	ГОСТ 12.1.004-91. Система стандартов безопасности труда. Пожарная безопасность. Общие требования : межгос. стандарт : утв. и введён в действие постановлением Государственного комитета СССР по управлению качеством продукции и стандартам от 14 июня 1991 г. № 875 : взамен ГОСТ 12.1.004-85 : дата введения 1992–07–01. – С изм. № 1, утв. в окт. 1993 г. – М. : Изд-во стандартов, 1992 ; переизд. М. : Стандартинформ, 2006. – Приложение 2 (обязательное).
3.	ГОСТ Р 57639–2017 (ИСО 16730-1:2015). Пожарно-технический анализ. Часть 1. Валидация и верификация методов расчёта = Fire safety engineering. Procedures and requirements for verification and validation of calculation methods. Part 1. General : нац. стандарт Российской Федерации : утв. и введён в действие приказом Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии от 5 сент. 2017 г. № 1009-ст : введён впервые : дата введения 2018–06–01. – Переизд. нояб. 2019 г. – М. : Стандартинформ, 2019. – IV, 35 с.
4.	СП 59.13330.2020. Доступность зданий и сооружений для маломобильных групп населения. СНиП 35-01-2001 : свод правил : утв. и введён в действие приказом Минстроя России от 30 дек. 2020 г. № 904/пр : дата введения 2021–07–01 : с изм. № 1 (приказ Минстроя России от 31.05.2022 № 434/пр), № 2 (от 21.11.2023 № 833/пр), № 3 (от 19.09.2024 № 630/пр), № 4 (от 27.12.2024 № 938/пр). – М. : Минстрой России, 2020.
5.	ISO 20414:2020. Fire safety engineering – Verification and validation protocol for building fire evacuation models. – 1st ed. – Geneva : International Organization for Standardization, 2020. – 69 p. – ICS 13.220.01. – URL: https://www.iso.org/standard/78348.html (дата обращения: 14.09.2026).
6.	Revised guidelines on evacuation analysis for new and existing passenger ships : MSC.1/Circ.1533, 6 June 2016. – London : International Maritime Organization, 2016. – 46 p. – Annex 3, Appendix 2. – URL: http://www.imorules.com/MSCCIRC_1533.html (дата обращения: 14.09.2026).
7.	Предтеченский, В. М. Проектирование зданий с учётом организации движения людских потоков : учеб. пособие для вузов / В. М. Предтеченский, А. И. Милинский. – 2-е изд., доп. и перераб. – М. : Стройиздат, 1979. – 375 с. : ил.
8.	Холщевников, В. В. Эвакуация и поведение людей при пожарах : учеб. пособие / В. В. Холщевников, Д. А. Самошин. – М. : Академия ГПС МЧС России, 2009. – 212 с.
9.	Эвакуация и поведение людей при пожарах : учеб. пособие / В. В. Холщевников, Д. А. Самошин, А. П. Парфёненко, И. С. Кудрин, Р. Н. Истратов, И. Р. Белосохов. – 2-е изд., доп. – М. : Академия ГПС МЧС России, 2015. – 262 с. – ISBN 978-5-9229-0115-4.
10.	Тестовые задачи для проверки точности моделирования времени эвакуации людей в случае пожара : учеб.-метод. пособие. Ч. 1 / В. В. Холщевников, Д. А. Самошин, Р. Н. Истратов, М. М. Шаранова. – М. : Академия ГПС МЧС России, 2019. – 26 с. – ISBN 978-5-6043591-0-5. – URL: http://fireevacuation.ru/files/testovye_zadachi.pdf (дата обращения: 14.09.2026).
11.	Самошин, Д. А. Состав людских потоков и параметры их движения при эвакуации : монография / Д. А. Самошин. – М. : Академия ГПС МЧС России, 2016. – 210 с. – ISBN 978-5-9229-0138-3.
12.	Холщевников, В. В. Натурные наблюдения людских потоков : учеб. пособие / В. В. Холщевников, Д. А. Самошин, И. И. Исаевич. – М. : Академия ГПС МЧС России, 2009. – 191 с. – ISBN 978-5-9229-0033-1.
13.	Истратов, Р. Н. Эвакуация и спасение людей при пожарах в домах для престарелых : учеб. пособие / Р. Н. Истратов, В. В. Холщевников, Д. А. Самошин ; под общ. ред. Б. Б. Серкова. – М. : Академия ГПС МЧС России, 2019. – 94 с. – ISBN 978-5-600-02476-2.
14.	Самошин, Д. А. К вопросу о статических и динамических габаритах пешеходов различных групп мобильности / Д. А. Самошин, С. В. Слюсарев // Вестник МГСУ. – 2016. – № 4. – С. 84–93. – ISSN 1997-0935. – DOI: 10.22227/1997-0935.2016.4.84-93.
15.	Самошин, Д. А. Особенности индивидуального движения людей различной мобильности в общем потоке эвакуируемых из здания при пожаре / Д. А. Самошин, С. В. Слюсарев // Технологии техносферной безопасности : интернет-журнал. – 2015. – Вып. № 3 (61). – С. 121–132. – URL: http://agps-2006.narod.ru/ttb/2015-3/43-03-15.ttb.pdf (дата обращения: 14.09.2026).
16.	Холщевников, В. В. Эвакуация людей с физическими ограничениями / В. В. Холщевников, Д. А. Самошин, Р. Н. Истратов // Технологии техносферной безопасности : интернет-журнал. – 2012. – Вып. № 3 (43). – С. 1–9. – URL: http://agps-2006.narod.ru/ttb/2012-3/05-03-12.ttb.pdf (дата обращения: 14.09.2026).

17.	Холщевников, В. В. Исследование проблем обеспечения пожарной безопасности людей с нарушением зрения, слуха и опорно-двигательного аппарата / В. В. Холщевников, Д. А. Самошин, Р. Н. Истратов // Пожаровзрывобезопасность. – 2013. – Т. 22, № 3. – С. 48–56. – DOI: 10.18322/PVB.2018.22.3.48-56.
18.	Милинский, А. И. Исследование процесса эвакуации зданий массового назначения : дис. … канд. техн. наук / Милинский Анатолий Иванович. – М., 1951. – 178 с.
19.	Копылов, В. А. Исследование параметров движения людей при вынужденной эвакуации : специальность 05.23.10 : дис. … канд. техн. наук / Копылов Владимир Андреевич. – М. : МИСИ, 1974. – 145 с.
20.	Истратов, Р. Н. Нормирование требований пожарной безопасности к эвакуационным путям и выходам в стационарах социальных учреждений по обслуживанию граждан пожилого возраста : специальность 05.26.03 : дис. … канд. техн. наук / Истратов Роман Николаевич. – М. : Академия ГПС МЧС России, 2014. – 160 с.
21.	Сёмин, А. А. Нормирование требований пожарной безопасности к эвакуационным путям и выходам в зданиях лечебных учреждений : специальность 05.26.03 : дис. … канд. техн. наук / Сёмин Алексей Алексеевич. – М. : Академия ГПС МЧС России, 2021. – 132 с. – URL: https://academygps.ru/upload/iblock/857/8ftgz0xe7cfslihsb55xhr21h7tsncqy/Диссертация%20Сёмина%20A.A..pdf (дата обращения: 14.09.2026).
22.	Шахуов, Т. Ж. Нормирование требований пожарной безопасности к эвакуационным путям и выходам из зданий мечетей : специальность 05.26.03 : дис. … канд. техн. наук / Шахуов Талгат Жумагулович. – М. : Академия ГПС МЧС России, 2019. – 125 с. – URL: https://academygps.ru/upload/iblock/d78/rlyov3y2q6h0r3mppb1e0xvs1ehsxoy1/Диссертация.pdf (дата обращения: 14.09.2026).
23.	Предтеченский, В. М. Движение людей при вынужденной эвакуации / В. М. Предтеченский, Т. А. Тарасова // Пожарное дело. – 1965. – № 7. – С. 30.
24.	Холщевников, В. В. Движение людских потоков через проёмы / В. В. Холщевников, В. А. Копылов // Пожарное дело. – 1982. – № 3. – С. 24–25.
25.	Самошин, Д. А. Экспериментальная установка. Результаты экспериментов : описание натурного опыта Академии ГПС МЧС России : проход группы через проём шириной 0,8 м в летней и зимней одежде (табл. 1–3) с видеозаписью опыта № 7 летней серии / Д. А. Самошин. – Неопубликованные материалы, переданы заказчиком. – Файл описания датирован 23 дек. 2024 г. ; год проведения опыта в материалах не указан.
26.	Самошин, Д. А. Тест на точность моделей эвакуации. Часть 1. Движение людских потоков : видеозапись натурных экспериментов Академии ГПС МЧС России : коридор 20 × 2 м ; комната 2 × 2 м с проёмом 0,88 м / Д. А. Самошин. – [2019]. – URL: https://youtu.be/5fbd4kexrzw (дата обращения: 14.09.2026).
27.	Seyfried, A. New insights into pedestrian flow through bottlenecks / A. Seyfried, O. Passon, B. Steffen, M. Boltes, T. Rupprecht, W. Klingsch // Transportation Science. – 2009. – Vol. 43, no. 3. – P. 395–406. – DOI: 10.1287/trsc.1090.0263. – Препринт: arXiv:physics/0702004.
28.	Liddle, J. An experimental study of pedestrian congestions: influence of bottleneck width and length / J. Liddle, A. Seyfried, W. Klingsch, T. Rupprecht, A. Schadschneider, A. Winkens // Traffic and Granular Flow '09, Shanghai, China, 2009. – arXiv: 0911.4350 [physics.soc-ph]. – 2009. – URL: https://arxiv.org/abs/0911.4350 (дата обращения: 14.09.2026).
29.	Seyfried, A. Enhanced empirical data for the fundamental diagram and the flow through bottlenecks / A. Seyfried, M. Boltes, J. Kähler, W. Klingsch, A. Portz, T. Rupprecht, A. Schadschneider, B. Steffen, A. Winkens // Pedestrian and Evacuation Dynamics 2008. – Berlin ; Heidelberg : Springer, 2010. – P. 145–156. – DOI: 10.1007/978-3-642-04504-2_11. – Препринт: arXiv:0810.1945.
30.	Zhang, J. Transitions in pedestrian fundamental diagrams of straight corridors and T-junctions / J. Zhang, W. Klingsch, A. Schadschneider, A. Seyfried // Journal of Statistical Mechanics: Theory and Experiment. – 2011. – Vol. 2011, iss. 06. – P. P06004. – DOI: 10.1088/1742-5468/2011/06/P06004. – Препринт: arXiv:1102.4766.
31.	Zhang, J. Quantification of bottleneck effects for different types of facilities / J. Zhang, A. Seyfried // Transportation Research Procedia. – 2014. – Vol. 2. – P. 51–59. – DOI: 10.1016/j.trpro.2014.09.008. – Препринт: arXiv:1508.06789.
32.	Liao, W. Measuring the steady state of pedestrian flow in bottleneck experiments / W. Liao, A. Tordeux, A. Seyfried, M. Chraibi, K. Drzycimski, X. Zheng, Y. Zhao // Physica A: Statistical Mechanics and its Applications. – 2016. – Vol. 461. – P. 248–261. – DOI: 10.1016/j.physa.2016.05.051. – Препринт: arXiv:1506.02433.
33.	Steffen, B. Methods for measuring pedestrian density, flow, speed and direction with minimal scatter / B. Steffen, A. Seyfried // Physica A: Statistical Mechanics and its Applications. – 2010. – Vol. 389, no. 9. – P. 1902–1910. – DOI: 10.1016/j.physa.2009.12.015.

34.	Kretz, T. Experimental study of pedestrian flow through a bottleneck / T. Kretz, A. Grünebohm, M. Schreckenberg // Journal of Statistical Mechanics: Theory and Experiment. – 2006. – Vol. 2006, iss. 10. – P. P10014. – DOI: 10.1088/1742-5468/2006/10/P10014. – Препринт: arXiv:physics/0610077.
35.	Pedestrian Dynamics Data Archive : наборы данных (траектории) / Forschungszentrum Jülich, Bergische Universität Wuppertal, Universität zu Köln. – Jülich : Forschungszentrum Jülich, 2005–2009. – Использованы: Bottleneck, Rotunde, 2005. DOI: 10.34735/ped.2005.2 ; Bottleneck, Caserne, 2006. DOI: 10.34735/ped.2006.2 ; T-Junction, 2009. DOI: 10.34735/ped.2009.7 ; Corner, 2009. DOI: 10.34735/ped.2009.8 ; Unidirectional flow, open boundary condition, 2D, 2009. DOI: 10.34735/ped.2009.14. – Лицензия CC BY 4.0. – URL: https://ped.fz-juelich.de/da (дата обращения: 14.09.2026).
36.	Nelson, H. E. Emergency Movement / H. E. Nelson, F. W. Mowrer // The SFPE Handbook of Fire Protection Engineering / ed. P. J. DiNenno [et al.]. – 3rd ed. – Quincy, MA : National Fire Protection Association ; Bethesda, MD : Society of Fire Protection Engineers, 2002. – Sect. 3, ch. 14. – P. 3-367–3-380.
37.	Gwynne, S. M. V. Employing the Hydraulic Model in Assessing Emergency Movement / S. M. V. Gwynne, E. R. Rosenbaum // SFPE Handbook of Fire Protection Engineering / ed. by M. J. Hurley [et al.]. – 5th ed. – New York : Springer, 2016. – Ch. 59. – P. 2115–2151. – DOI: 10.1007/978-1-4939-2565-0_59.
38.	SFPE Guide to Human Behavior in Fire / Society of Fire Protection Engineers. – 2nd ed. – Cham : Springer International Publishing, 2019. – XIV, 159 p. – ISBN 978-3-319-94696-2. – DOI: 10.1007/978-3-319-94697-9.
39.	Lord, J. Guide for evaluating the predictive capabilities of computer egress models / J. Lord, B. Meacham, A. Moore, R. Fahy, G. Proulx. – Gaithersburg, MD : National Institute of Standards and Technology, 2005. – (NIST GCR ; 06-886). – URL: https://tsapps.nist.gov/publication/get_pdf.cfm?pub_id=101376 (дата обращения: 14.09.2026).
40.	Ronchi, E. A method for the analysis of behavioural uncertainty in evacuation modelling / E. Ronchi, P. A. Reneke, R. D. Peacock // Fire Technology. – 2014. – Vol. 50, no. 6. – P. 1545–1571. – DOI: 10.1007/s10694-013-0352-7.
41.	Ronchi, E. The Process of Verification and Validation of Building Fire Evacuation Models / E. Ronchi, E. D. Kuligowski, P. A. Reneke, R. D. Peacock, D. Nilsson. – Gaithersburg, MD : National Institute of Standards and Technology, 2013. – 84 p. – (NIST Technical Note ; 1822). – DOI: 10.6028/NIST.TN.1822.
42.	Galea, E. R. An evacuation validation data set for large passenger ships / E. R. Galea, S. Deere, R. Brown, L. Filippidis // Pedestrian and Evacuation Dynamics 2012. – Cham : Springer International Publishing, 2014. – P. 109–123. – DOI: 10.1007/978-3-319-02447-9_7.
43.	Galea, E. R. The SAFEGUARD validation data set – SGVDS2 : a guide to the data and validation procedures / E. R. Galea, S. Deere, L. Filippidis. – Greenwich : Fire Safety Engineering Group, University of Greenwich, 2012. – 18 p. – URL: https://fseg.gre.ac.uk/validation/ship_evacuation/ (дата обращения: 14.09.2026).
44.	Peacock, R. D. Quantifying fire model evaluation using functional analysis / R. D. Peacock, P. A. Reneke, W. D. Davis, W. W. Jones // Fire Safety Journal. – 1999. – Vol. 33, no. 3. – P. 167–184. – DOI: 10.1016/S0379-7112(99)00029-6.
45.	Kuligowski, E. D. Movement on Stairs During Building Evacuations / E. D. Kuligowski, R. D. Peacock, P. A. Reneke, E. Wiess, C. R. Hagwood, K. J. Overholt, R. P. Elkin, J. D. Averill, E. Ronchi, B. L. Hoskins, M. Spearpoint. – Gaithersburg, MD : National Institute of Standards and Technology, 2015. – 213 p. – (NIST Technical Note ; 1839). – DOI: 10.6028/NIST.TN.1839.
46.	NIST TN 1839 Spreadsheets : архив поштучных замеров к NIST Technical Note 1839 : 31 книга .xlsx, 30 лестничных клеток 14 зданий : [электронный ресурс]. – Gaithersburg, MD : National Institute of Standards and Technology, [2015]. – URL: https://www.nist.gov/document/nist-tn-1839-spreadsheetszip (дата обращения: 14.09.2026).
47.	Peacock, R. D. Overall and local movement speeds during fire drill evacuations in buildings up to 31 stories / R. D. Peacock, B. L. Hoskins, E. D. Kuligowski // Safety Science. – 2012. – Vol. 50, no. 8. – P. 1655–1664. – DOI: 10.1016/j.ssci.2012.01.003.
48.	Peacock, R. D. Overall and Local Movement Speeds During Fire Drill Evacuations in Buildings up to 31 Stories / R. D. Peacock, B. L. Hoskins, E. D. Kuligowski. – Gaithersburg, MD : National Institute of Standards and Technology, 2010. – 32 p. – (NIST Technical Note ; 1675). – URL: https://tsapps.nist.gov/publication/get_pdf.cfm?pub_id=906798 (дата обращения: 14.09.2026).
49.	Fujiyama, T. An explicit study on walking speeds of pedestrians on stairs / T. Fujiyama, N. Tyler // 10th International Conference on Mobility and Transport for Elderly and Disabled People (TRANSED 2004), Hamamatsu, Japan. – 2004. – P. 643–652.
50.	Reynolds, C. W. Steering Behaviors For Autonomous Characters // Proceedings of the Game Developers Conference 1999, San Jose, CA. – San Francisco, CA : Miller Freeman Game Group, 1999. – P. 763–782. – URL: https://www.red3d.com/cwr/papers/1999/gdc99steer.html (дата обращения: 14.09.2026).
51.	Ben Amor, H. Fast, Neat, and Under Control: Arbitrating Between Steering Behaviors / H. Ben Amor, J. Murray, O. Obst // AI Game Programming Wisdom 3 / ed. by S. Rabin. – Boston, MA : Charles River Media, 2006. – ISBN 978-1-58450-457-3.

52.	Johnson, G. Smoothing a Navigation Mesh Path // AI Game Programming Wisdom 3 / ed. by S. Rabin. – Boston, MA : Charles River Media, 2006. – ISBN 978-1-58450-457-3.
53.	Fruin, J. J. Pedestrian Planning and Design. – Rev. ed. – Mobile, AL : Elevator World, Educational Services Division, 1987. – 1st ed.: New York : Metropolitan Association of Urban Designers and Environmental Planners, 1971.
54.	SFPE Handbook of Fire Protection Engineering / ed. by M. J. Hurley (editor-in-chief), D. T. Gottuk, J. R. Hall Jr., K. Harada, E. D. Kuligowski, M. Puchovsky, J. L. Torero, J. M. Watts Jr., C. J. Wieczorek. – 5th ed. – New York : Springer, 2016. – XVIII, 3493 p. – ISBN 978-1-4939-2564-3. – DOI: 10.1007/978-1-4939-2565-0.
55.	RiMEA-Richtlinie für Mikroskopische Entfluchtungsanalysen = Guideline for Microscopic Evacuation Analysis : Version 4.1.1 vom 11.09.2025 / RiMEA e. V. – [S. l.] : RiMEA e. V., 2025. – Немецкая редакция – основная. – Лицензия CC BY-ND 4.0. – URL: https://www.rimea.de (дата обращения: 14.09.2026).