АО «Современные программные технологии»

Fenix+ 3

(3.1.3)

Эвакуация людей.

Валидация и верификация. Часть 2.

(тесты из учебно-методического пособия

«Тестовые задачи для проверки точности моделирования времени эвакуации людей в случае пожара. Часть 1.»

Авторы: В. В. Холщевников, Д. А. Самошин Р. Н. Истратов, М. М. Шаранова

М.: Академия ГПС МЧС России, 2019)

2022 г.

Содержание

Содержание ... 2
Предупреждение ... 3
Назначение программы ... 4
Валидация и верификация ... 5
Основные элементы программы Fenix+ 3, используемые в тестах ... 6
Тесты ... 7
Тесты из учебно-методического пособия [5] ... 8
Test_901 Движение по горизонтальному участку без проема ... 9
Test_902 Движение по горизонтальному участку с дверным проемом шириной 1,2 м ... 10
Test_903 Движение по горизонтальному участку с дверным проемом шириной 0,8 м ... 14
Test_904 Движение по горизонтальному участку с дверным проемом шириной 1,6 м ... 16
Test_905 Движение по горизонтальному участку с дверным проемом шириной 1,2 м ... 20
Test_906 Движение по горизонтальному участку с дверным проемом шириной 0,8 м ... 22
Test_907 Движение по горизонтальному участку с дверным проемом шириной 1,6 м ... 24
Test_908 Слияние людских потоков на горизонтальном участке ... 26
Заключение и выводы ... 28
Приложение 1. Параметры контингентов людей ... 29
Приложение 2. Вариант совершенствования методики определения «эталонного» времени движения, предложенного в пособии [5] ... 31
Приложение 3. Значение $\boldsymbol{Dthreshold}$ для некоторых контингентов людей ... 33
Приложение 4. Метод определения отклонения ... 34
Список литературы ... 35

Предупреждение

АО «Современные программные технологии» не дает никаких гарантий, выраженных или подразумеваемых, пользователям программы Fenix+ 3 (далее - **программа**) и не несет никакой ответственности за использование программы.
Пользователи программы несут полную ответственность за определение уместности её применения в каждом конкретном случае и за выводы, сформированные на основе результатов, полученных с её помощью.
Программа предназначена для использования только компетентными в области моделирования эвакуации пользователями. Программа предназначена лишь для дополнения обоснованного мнения квалифицированного пользователя. Все результаты, получаемые с помощью программы, должны оцениваться квалифицированным пользователем.

Назначение программы

Программа **Fenix+ 3** позволяет независимо провести моделирование эвакуации людей и моделирование динамики развития пожара в здании.

Моделирование эвакуации проводится по индивидуально-поточной модели движения людей, реализованной в Fenix+ 3. Модель основана на положениях и зависимостях, приведенных в [1] и [3].

Валидация и верификация

Согласно стандартам ISO 9000:
Валидация - подтверждение на основе представления объективных свидетельств того, что требования, предназначенные для конкретного использования или применения, выполнены.

Верификация - подтверждение на основе представления объективных свидетельств того, что установленные требования были выполнены.

Применительно к системам, предназначенным для моделирования физических процессов, термин **Валидация**, можно определить следующим образом:
Валидация - подтверждение на основе представления объективных свидетельств того, что результаты моделирования физического процесса соответствуют результатам физического эксперимента.

Настоящий документ содержит набор тестов, предназначенных для подтверждения соответствия процесса эвакуации людей из здания результатам моделирования эвакуации, получаемым с помощью программы Fenix+ 3.

Результаты моделирования эвакуации, полученные с помощью программы Fenix+ 3 сравниваются с математическими зависимостями, представленными в Приложении к Приказу МЧС России № 382 от 30.06.2009 г. «Методика определения расчетных величин пожарного риска в зданиях, сооружениях и пожарных отсеках различных классов функциональной пожарной опасности» (ред. от 02.12.2015 г.) [1].

Так как зависимости, представленные в [1], обобщают результаты наблюдений натурных экспериментов по движению и эвакуации людей, то, считаем допустимым сравнивать результаты моделирования не с конкретными натурными наблюдениями, а с зависимостями, их обобщающими.

Настоящий документ и набор тестов, представленный в нем, будет дополняться и корректироваться при внесении изменений в программу Fenix+ 3, методику определения расчетных величин пожарного риска [1], а также при уточнении самих тестов.

Основные элементы программы Fenix+ 3, используемые в тестах

Регистратор – элемент, предназначенный для сбора информации о количестве и времени прохождения людей. Считается, что человек прошел через регистратор, если его траектория пересеклась с линией регистратора.
Регистратор может быть двух типов: отдельностоящий и регистратор в двери.

Выход – область, в которую движутся люди.

Контингент людей – совокупность людей, образующих однородную группу. Контингент характеризуется геометрическими характеристиками и свойствами, определяющими характер движения человека по путям различного типа.

Подробнее с вышеуказанными элементами можно ознакомиться в руководстве пользователя к программе Fenix+ 3 [4].

Тесты

Каждый тест предназначен для проверки одного аспекта процесса эвакуации при определенных условиях.
Пример теста: «*Test_901_001: Движение по горизонтальному участку без проема при начальной плотности размещения людей 0,1 м²/м².*»).

Несколько тестов могут быть объединены в группу тестов. В одной группе тестов каждый тест отличается только одним параметром.
Пример группы тестов: «*Test_901: Движение по горизонтальному участку без проема*». В этой группе тестов изменяющийся параметр – начальная плотность размещения людей.

Каждый тест имеет уникальный идентификатор вида Test_XXX_YYY, где:
Test_XXX – идентификатор группы тестов, а YYY – номер теста в группе.

Как правило, все тесты из одной группы выполнены в одном проекте программы Fenix+ 3 в виде отдельных сценариев. При этом название проекта совпадает с идентификатором группы тестов, а название каждого сценария с идентификатором теста.

Все тесты созданы с помощью общедоступных инструментов программы Fenix+ 3 и могут быть самостоятельно воспроизведены пользователями.
Кроме того, все тестовые проекты могут быть загружены с сайта АО «Современные программные технологии» по ссылкам, представленным в описании каждого теста.

Тесты из учебно-методического пособия [5]

В этом документе приводятся результаты выполнения всех тестов, предлагаемых в учебно-методическом пособии [5] (далее - **пособие**). Кроме тестов, предлагаемых в пособии, также выполнен ряд дополнительных тестов, которые не выходят за рамки методики, предлагаемых в пособии, но рассматривают расширенный набор исходных параметров. Также подробно обсуждаются полученные результаты.

Все тестовые проекты для тестов, рассмотренных в этом документе, можно загрузить одним архивом по ссылке: https://mst.su/download/data/v3/fenixplus3_validation_part2_tests.zip

Test_901 Движение по горизонтальному участку без проема

Описание теста

Сценарий представляет собой коридор шириной 2 м и длиной 20 м. В коридоре находится такое количество людей, чтобы обеспечить требуемую начальную плотность размещения людей. Контингент всех людей «Взрослый человек в летней одежде». Параметры контингентов людей представлены в приложении 1. Время начала движения всех людей равно нулю. Более детально с описанием теста можно ознакомиться в пособии.
Время движения людей определяется по последнему человеку, прошедшему через регистратор в конце коридора.

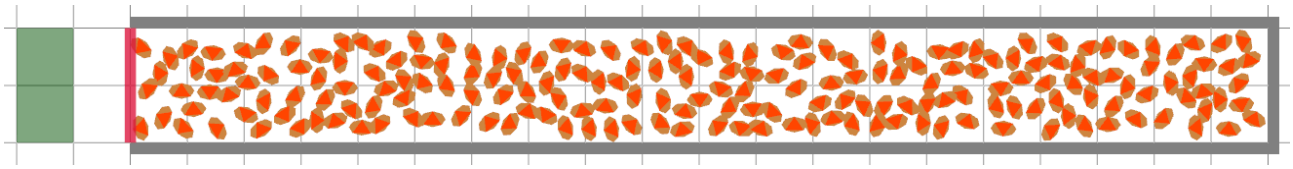

Рис. 1. Начальная плотность размещения людей 0,5 м^2/м^2.

Ожидаемые результаты

Время движения людей соответствует значению, предлагаемому в пособии.

Ссылка для загрузки тестового проекта

Test_901.fnx

Результаты моделирования

В таблице 1 представлены результаты моделирования.

Test ID	Номер теста в пособии	D, м^2/м^2	Время движения, с		Отклонение, %
			Пособие	Fenix+ 3	
Test_901_001	1-2	0,1	15,00	15,4	2,7
Test_901_002	2-2	0,2	20,00	23,2	16,0
Test_901_003	3-2	0,3	25,50	30,5	19,6
Test_901_004	4-2	0,4	30,00	39,0	30,0
Test_901_005	5-2	0,5	36,40	47,2	29,7
Test_901_006	6-2	0,6	42,90	54,8	27,7
Test_901_007	7-2	0,7	52,20	63,2	21,1
Test_901_008	8-2	0,8	63,20	71,0	12,3
Test_901_009	9-2	0,9	80,00	78,8	-1,5

Табл. 1. Движение по горизонтальному участку без проема.

Анализ результатов

Результаты моделирования тестов как правило несколько выше значений, предлагаемых в пособии.

Test_902 Движение по горизонтальному участку с дверным проемом шириной 1,2 м

Описание теста

Сценарий представляет собой коридор шириной 2 м и длиной 20 м, на одном конце которого расположена дверь шириной 1,2 м. В коридоре находится такое количество людей, чтобы обеспечить требуемую начальную плотность размещения людей. Контингент всех людей «Взрослый человек в летней одежде». Параметры контингентов людей представлены в приложении 1. Время начала движения всех людей равно нулю. Более детально с описанием теста можно ознакомиться в пособии.

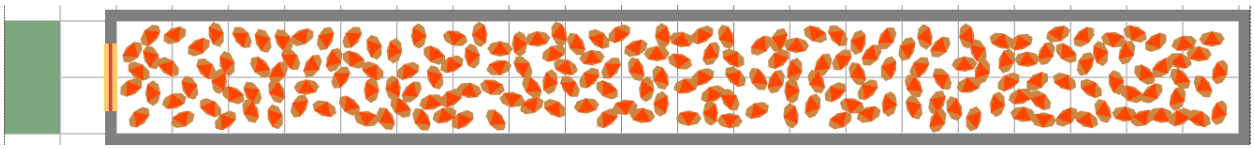

Рис. 2. Тест при начальной плотности 0,5 м^2/м^2.

Ожидаемые результаты

Время движения людей через дверной проем соответствует значению, предлагаемому в пособии.

Ссылка для загрузки тестового проекта

Test_902.fnx

Результаты моделирования

В таблице 2 представлены результаты выполнения тестов и выполнено их сравнение со значениями, предлагаемыми в пособии.

Test ID	Номер теста в пособии	D, м^2/м^2	Время движения, с		Отклонение, %
			Пособие	Fenix+ 3	
Test_902_001	10-2	0,1	15,00	16,4	9,3
Test_902_002	11-2	0,2	57,14	25,4	-55,5
Test_902_003	12-2	0,3	85,71	52,6	-38,6
Test_902_004	13-2	0,4	114,29	104,6	-8,5
Test_902_005	14-2	0,5	142,86	134,2	-6,1
Test_902_006	15-2	0,6	171,43	164,4	-4,1
Test_902_007	16-2	0,7	200,00	192,4	-3,8
Test_902_008	17-2	0,8	228,57	221,8	-3,0
Test_902_009	18-2	0,9	257,14	252,6	-1,8

Табл. 2. Движение по горизонтальному участку с дверным проемом 1,2 м.

Анализ результатов

Если отбросить тест Test_902_001, то можно сделать ряд наблюдений:

1. Отклонение для всех тестов отрицательное, то есть, время движения, полученное в результате моделирования, меньше времени, предлагаемого в пособии.
2. Отклонение, превышающее 10 % - значение, которое в пособии предлагается считать допустимым, наблюдается лишь для тестов с небольшой начальной плотностью размещения людей (0,2 м^2/м^2 и 0,3 м^2/м^2). Для тестов с большей плотностью отклонение не превышает 10 %.
3. С увеличением плотности начального размещения людей отклонение уменьшается (см. рис. 3).

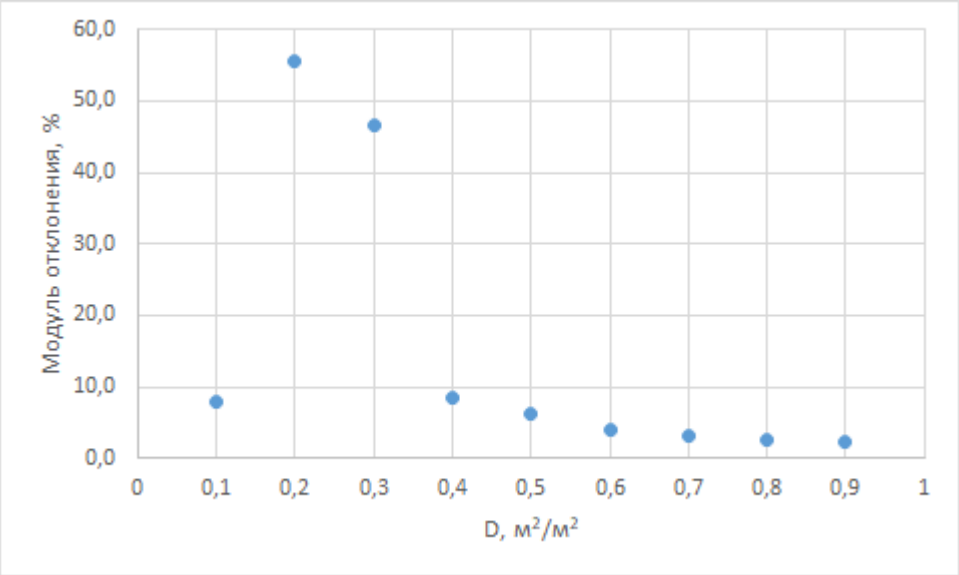

Рис. 3. Модуль отклонения результатов моделирования.

Разберем, почему получаются такие зависимости и отклонения.

В пособии предлагается определять время движения для каждого теста либо по формуле (2.1) пособия либо по формуле (2.3) пособия в зависимости от соотношения интенсивности движения в коридоре и максимальной возможной интенсивности движения через дверной проем $q_{max} = 19{,}6$ м/мин.

Единой формулой время движения людей можно записать так:

$$t(D) = \begin{cases} t_{Low}(D), \text{если } q_2 \leq q_{max} \\ t_{High}(D), \text{если } q_2 > q_{max} \end{cases} \qquad (1)$$

где $t_{Low}(D)$ – формула (2.1) пособия, а $t_{High}(D)$ – формула (2.3) пособия. «*Low*» и «*High*» указывают на область применимости этих формул – соответственно «низкую» и «высокую» начальную плотность размещения людей.

$$q_2(D) = q_1(D) \cdot \frac{b_1}{b_2} \qquad (2)$$

$$q_1(D) = V(D) \cdot D \qquad (3)$$

где $q_1(D)$ – интенсивность движения в коридоре, b_1 – ширина коридора, b_2 – ширина дверного проема, $V(D)$ – скорость движения людей в зависимости от плотности (см. формулу П.1 приложения 1).

Если немного преобразовать формулы (2.1) и (2.3) пособия, то получаются зависимости (4) и (5), в которых единственная переменная величина – начальная плотность размещения людей (D). Остальные значения определяются только топологией теста (длина и ширина участков) и контингентом размещенных людей.

$$t_{Low}(D) = \frac{l}{V(D)} \qquad (4)$$

$$t_{High}(D) = D \cdot \frac{l \cdot b_1}{q_{D_{max}} \cdot b_2} \qquad (5)$$

Одним из ключевых допущений в пособии является то, что переход от формулы $t_{Low}(D)$ к $t_{High}(D)$ с увеличением плотности происходит мгновенно – в какой-то момент добавление одного единственного человека приводит к тому, что соотношение между q_2 и q_{max} меняется на противоположное и время движения уже надо определять не по формуле $t_{Low}(D)$, а по $t_{High}(D)$.

На рисунке 4 показана зависимость $t(D)$ (см. формулу 1).
Зеленым цветом показан участок, значения на котором определяются по формуле $t_{Low}(D)$, красным – по $t_{High}(D)$. Синие точки – результаты моделирования с помощью Fenix+ 3.

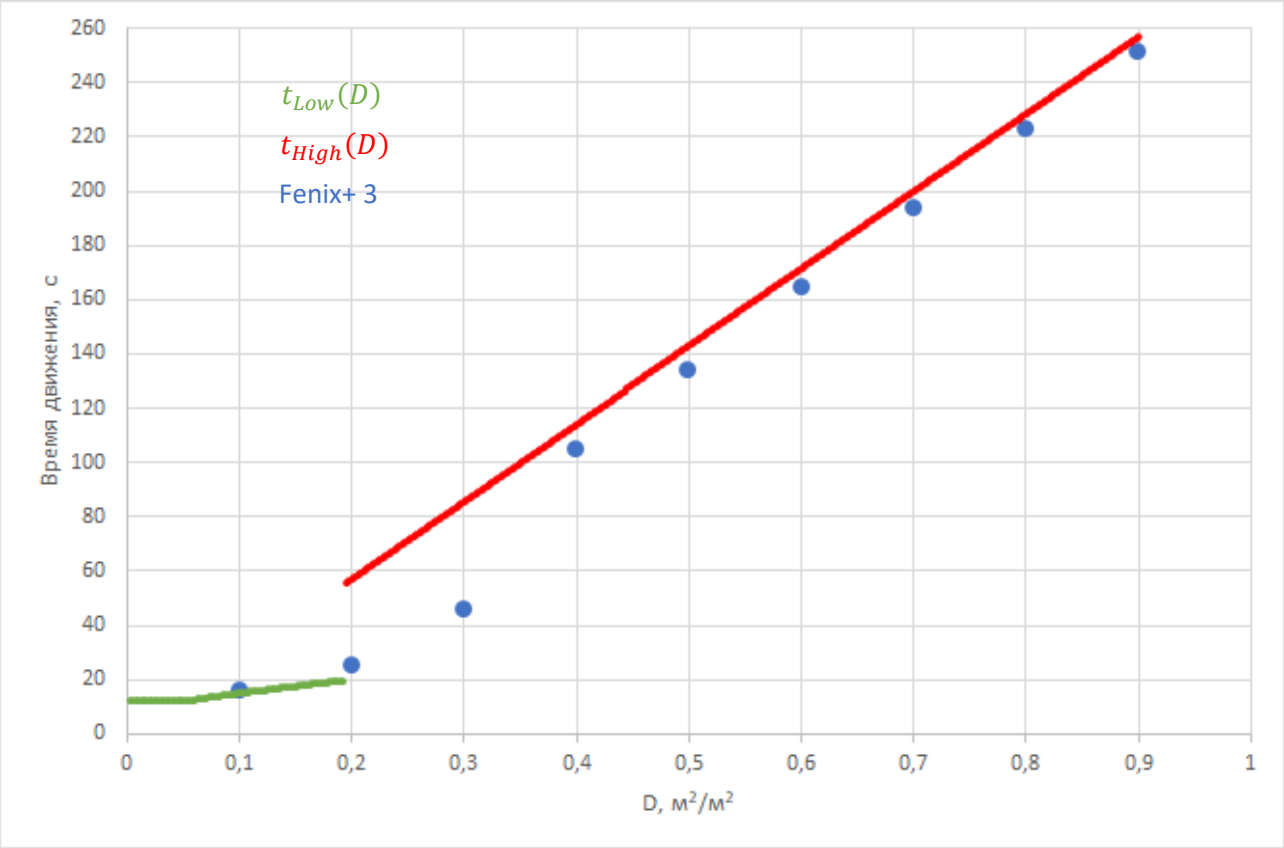

Рис. 4. Зависимость времени движения от начальной плотности размещения людей.

На графике есть разрыв в зависимости $t(D)$ в момент перехода от формулы $t_{Low}(D)$ к $t_{High}(D)$. $D_{threshold}$ - плотность, при которой происходит переход. Интуитивно понятно, что в реальности добавление одного человека не должно приводить к такому большому изменению времени движения людей.

Рисунок 4 демонстрирует эффект мгновенного образования скопления с максимальной плотностью перед дверным проемом, если его пропускная способность недостаточна.
Как замечается в работе [6], условие мгновенного образования максимальной плотности, которое применяется в упрощенной аналитической модели эвакуации, приводит к

существенному увеличению времени движения по сравнению с более точными моделями (например, имитационно-стохастической или индивидуально-поточной). Действительно, ведь люди, находящиеся в головной части потока успевают преодолеть проем беспрепятственно до подхода основной части и образования скопления. Они будут иметь возможность преодолеть проем с более высокой скоростью, а количество людей в скоплении уменьшится, и тем самым заметно сократится время существования скоплений.

Количество людей, успевающих преодолеть проем до образования скопления определяется шириной проема и начальной плотностью размещения людей. Чем начальная плотность ниже, а ширина проема больше, тем большее количество людей успеет преодолеть проем до образования скопления. А при достаточно большой начальной плотности только люди, расположенные непосредственно перед дверным проемом, будут иметь возможность беспрепятственно его преодолеть.
То есть, всегда некоторая часть людей проходит через дверной проем беспрепятственно. И чем меньше начальная плотность размещения людей, тем количество этих людей больше. Получается, что формула $t_{Low}(D)$ применима только в случае низкой начальной плотности размещения людей, а $t_{High}(D)$ в случае высоких начальных плотностей. При этом есть некоторый интервал плотностей, в которой нельзя применять ни $t_{Low}(D)$ ни $t_{High}(D)$.

Вернемся теперь к результатам выполнения тестов.
В тесте Test_902_001 начальная площадь размещения людей минимальная (0,1 м^2/м^2). Она находится в области плотностей где применима формула $t_{Low}(D)$ и, поэтому, отклонение результатов моделирования небольшое.

В тестах Test_902_004 - Test_902_009 плотность уже относительно большая (больше 0,4 м^2/м^2) и становится применимой формула $t_{High}(D)$. Отклонение в этих тестах также небольшое. Отклонение отрицательное (время движения меньше значения, получаемого по формуле) так как, как говорилось выше, часть людей успевают пройти через дверной проем до образования скопления перед ним с большей скоростью.

В тестах Test_902_002 и Test_902_003 плотность такова, что, по всей видимости, как раз и находится в интервале плотностей, где ни одна из предлагаемых в пособии формул (ни $t_{Low}(D)$ ни $t_{High}(D)$) неприменима. Однако, в соответствии с пособием, для этих тестов время движения определяется по формуле $t_{High}(D)$, которая дает существенно завышенное значение, что и обуславливает большое отклонение результатов моделирования.

Вышеприведенные рассуждения позволяют сделать следующие выводы:

1. Значения времени движения, получаемые методом, предлагаемым в пособии [5], применимы для упрощенной аналитической модели на всем интервале плотностей.
2. Для имитационно-стохастической модели и индивидуально-поточных моделей получаемые по пособию [5] значения применимы не на всем интервале плотностей. Формула $t_{Low}(D)$ (формула 2.1 пособия) применима для малых плотностей. Формула $t_{High}(D)$ (формула 2.3 пособия) применима для больших плотностей.
3. Считаем, что пособие [5] требует доработки с целью уточнения «эталонного» времени движения для имитационно-стохастической и индивидуально-поточных моделей на интервале плотностей где формулы $t_{Low}(D)$ и $t_{High}(D)$ неприменимы. Один из возможных вариантов уточнения предложен в приложении 2.

Test_903 Движение по горизонтальному участку с дверным проемом шириной 0,8 м

Описание теста

Группа тестов Test_903 полностью совпадает с группой тестов Test_902 за тем лишь исключением, что ширина дверного проема меньше чем в тесте Test_902 и составляет 0,8 м. Более детально с описанием теста можно ознакомиться в пособии.

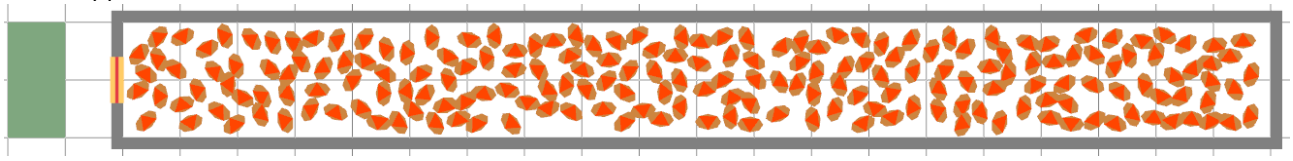

Рис. 5. Тест при начальной плотности 0,5 м^2/м^2.

Ожидаемые результаты

Время движения людей через дверной проем соответствует значению, предлагаемому в пособии.

Ссылка для загрузки тестового проекта

Test_903.fnx

Результаты моделирования

В таблице 3 представлены результаты выполнения тестов и выполнено их сравнение со значениями, предлагаемыми в пособии.

Test ID	Номер теста в пособии	D, м^2/м^2	Время движения, с		Отклонение, %
			Пособие	Fenix+ 3	
Test_903_001	19-2	0,1	54,55	18,0	-67,0
Test_903_002	20-2	0,2	109,09	91,2	-16,4
Test_903_003	21-2	0,3	163,64	147,8	-9,7
Test_903_004	22-2	0,4	218,18	205,4	-5,9
Test_903_005	23-2	0,5	272,73	261,6	-4,1
Test_903_006	24-2	0,6	327,27	315,4	-3,6
Test_903_007	25-2	0,7	381,82	373,0	-2,3
Test_903_008	26-2	0,8	436,36	425,0	-2,6
Test_903_009	27-2	0,9	490,91	478,4	-2,5

Табл. 3. Движение по горизонтальному участку с дверным проемом 0,8 м.

Анализ результатов

Группы тестов Test_902 и Test_903 отличаются лишь шириной дверного проема. Поэтому, причины отклонения результатов моделирования от значений, предлагаемых в пособии, те же самые, что и в группе тестов Test_902, для которых был выполнен подробный анализ.

Здесь же просто приведем графики зависимости отклонения от плотности (рис. 6) и зависимость $t(D)$ (рис. 7)

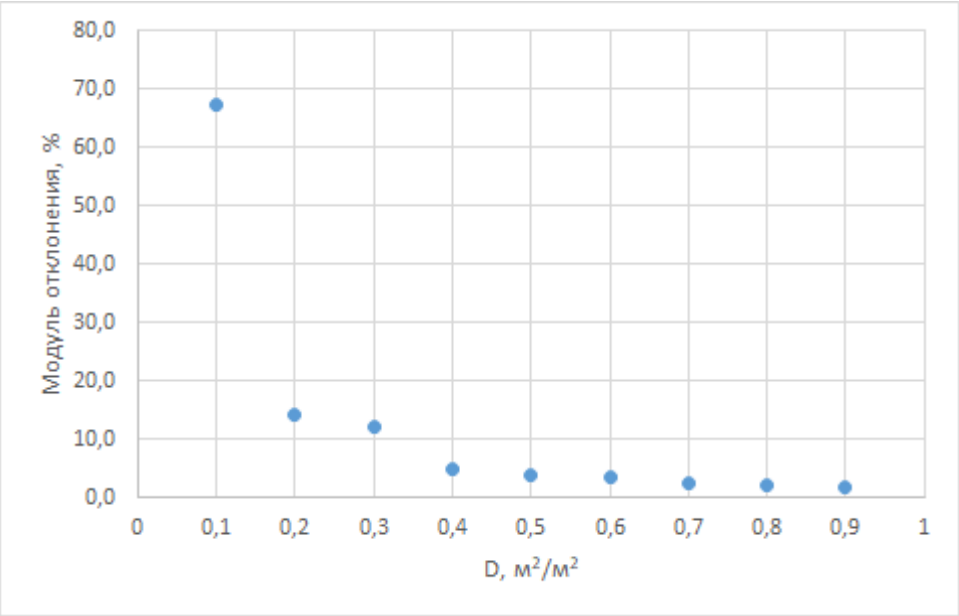

Рис. 6. Модуль отклонения результатов моделирования.

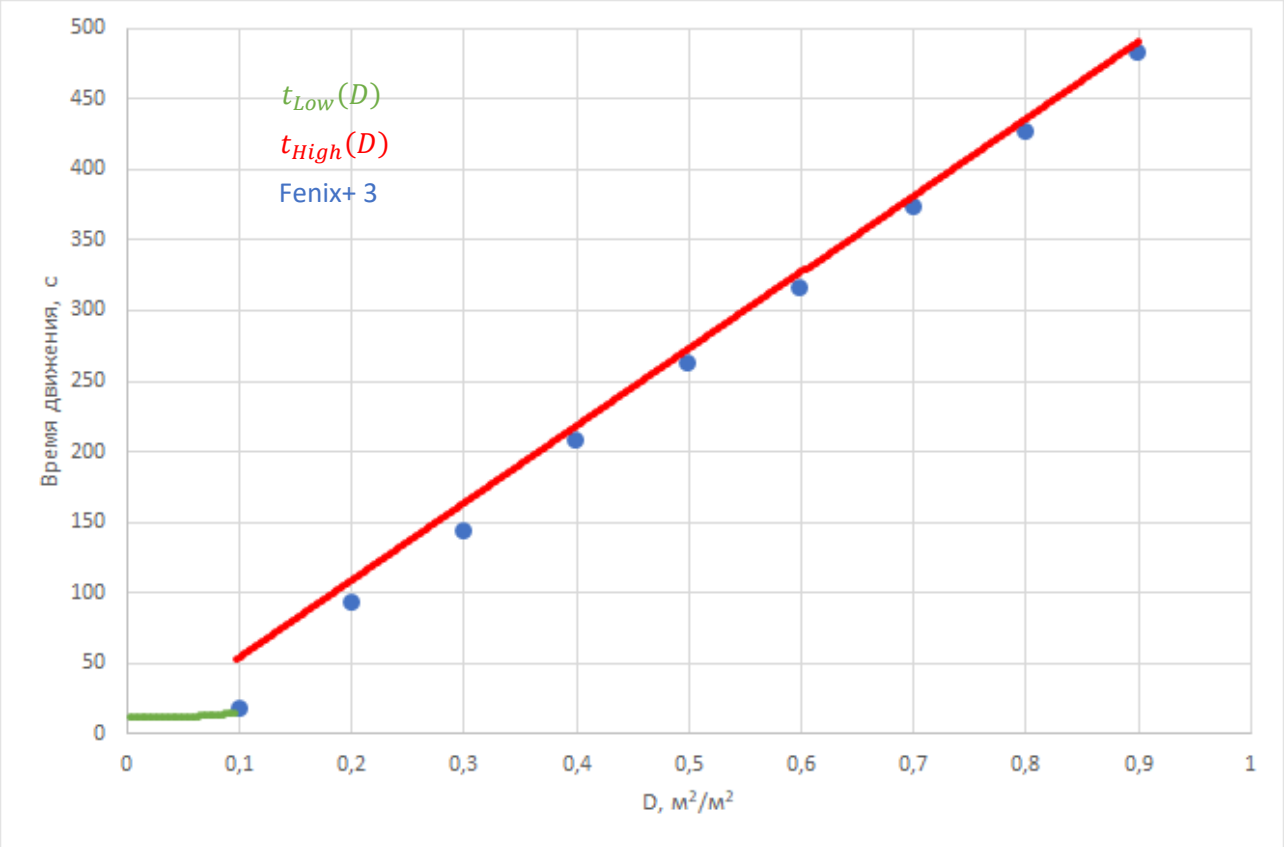

Рис. 7. Зависимость времени движения от начальной плотности размещения людей.

Test_904 Движение по горизонтальному участку с дверным проемом шириной 1,6 м

Описание теста

Группа тестов Test_904 полностью совпадает с группами тестов Test_902 и Test_903 за тем лишь исключением, что ширина дверного проема наибольшая из всех тестов и составляет 1,6 м.

Этот тест отсутствует в пособии [5], но его результаты представлены в [7].

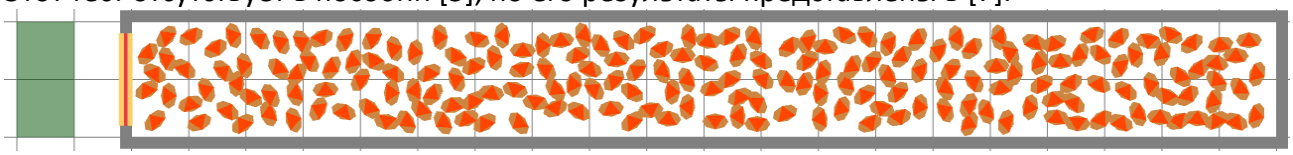

Рис. 8. Тест при начальной плотности 0,5 м^2/м^2.

Ожидаемые результаты

Время движения людей через дверной проем соответствует значению, которое можно рассчитать в соответствии с методикой, предлагаемой в пособии [5].

Ссылка для загрузки тестового проекта

Test_904.fnx

Результаты моделирования

В таблице 4 представлены результаты выполнения тестов и выполнено их сравнение со значениями, рассчитанными по методике, предлагаемой в пособии [5].

Test ID	Номер теста в пособии	D, м^2/м^2	Время движения, с		Отклонение, %
			Пособие	Fenix+ 3	
Test_904_001	-	0,1	14,97	15,4	2,9
Test_904_002	-	0,2	20,10	22,8	13,4
Test_904_003	-	0,3	25,14	32,0	27,3
Test_904_004	-	0,4	70,59	39,2	-44,5
Test_904_005	-	0,5	88,24	48,2	-45,4
Test_904_006	-	0,6	105,88	99,6	-5,9
Test_904_007	-	0,7	123,53	119,4	-3,3
Test_904_008	-	0,8	63,85	138,0	116,1
Test_904_009	-	0,9	78,34	156,2	99,4

Табл. 4. Движение по горизонтальному участку с дверным проемом 1,6 м.

Анализ результатов

В отличие от группы тестов Test_902 и Test_903, которые отличались лишь количественно, результаты группы тестов Test_904 имеют существенное качественное отличие от тестов Test_902 и Test_903.

На рисунках ниже приведены графики зависимости отклонения от плотности (рис. 9) и зависимость $t(D)$ (рис. 10)

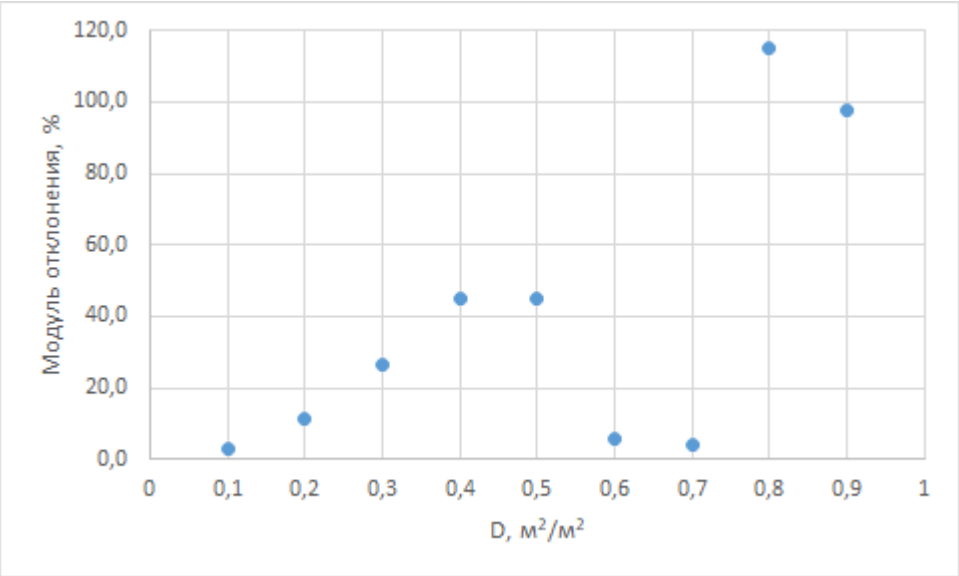

Рис. 9. Модуль отклонения результатов моделирования.

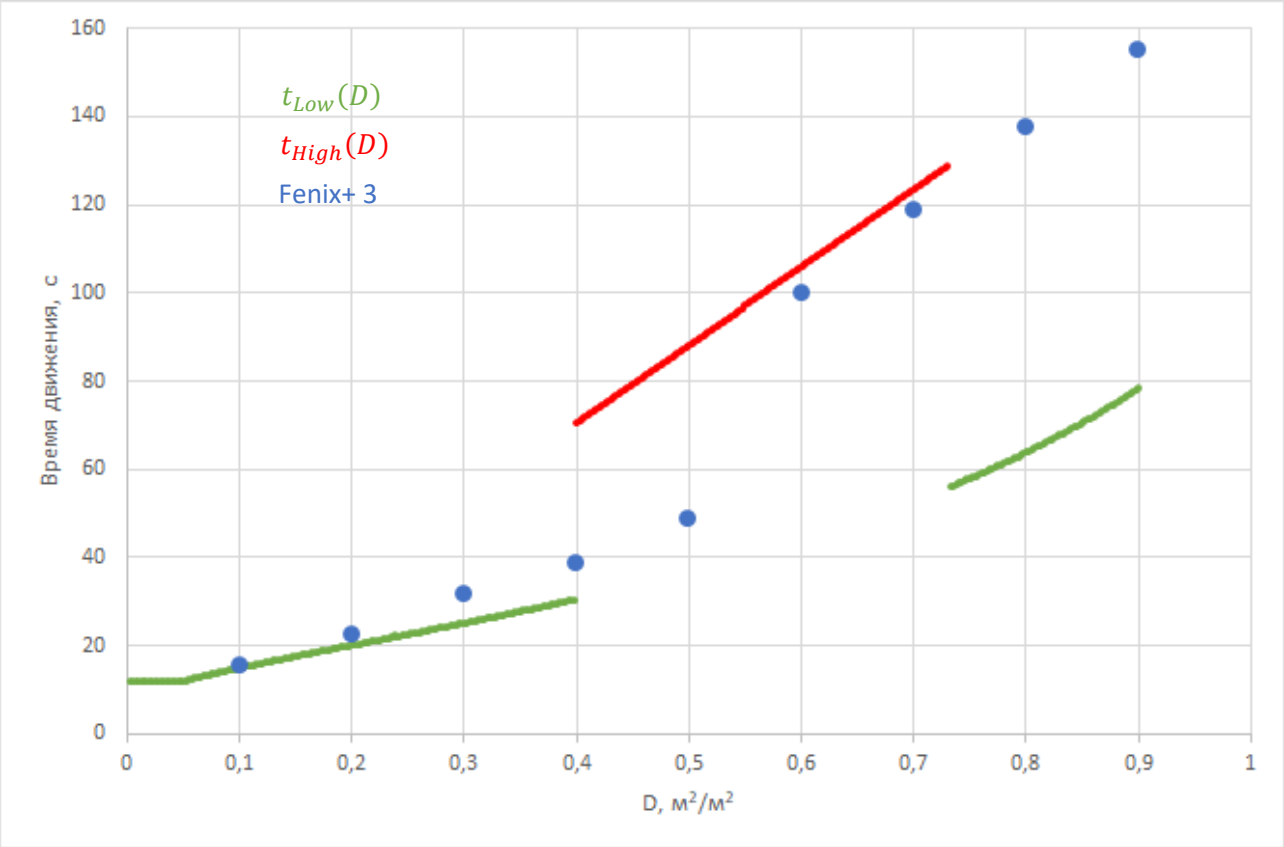

Рис. 10. Зависимость времени движения от начальной плотности размещения людей.

Из таблицы 4 и графиков видно, что наибольшее отклонение при максимальных начальных плотностях потока. И, самое важное, на графике зависимости $t(D)$ (см. формулу 1) появляется вторая точка разрыва. Начиная с плотности чуть меньше 0,75 м²/м² время опять определяется по формуле $t_{Low}(D)$ (см. анализ теста Test_902).
Почему это произошло становится понятно если построить график зависимости $q_2(D)$.
На рисунке 11 видно, что зависимость $q_2(D)$ имеет максимум, и принимает значения меньше q_{max} на двух интервалах.

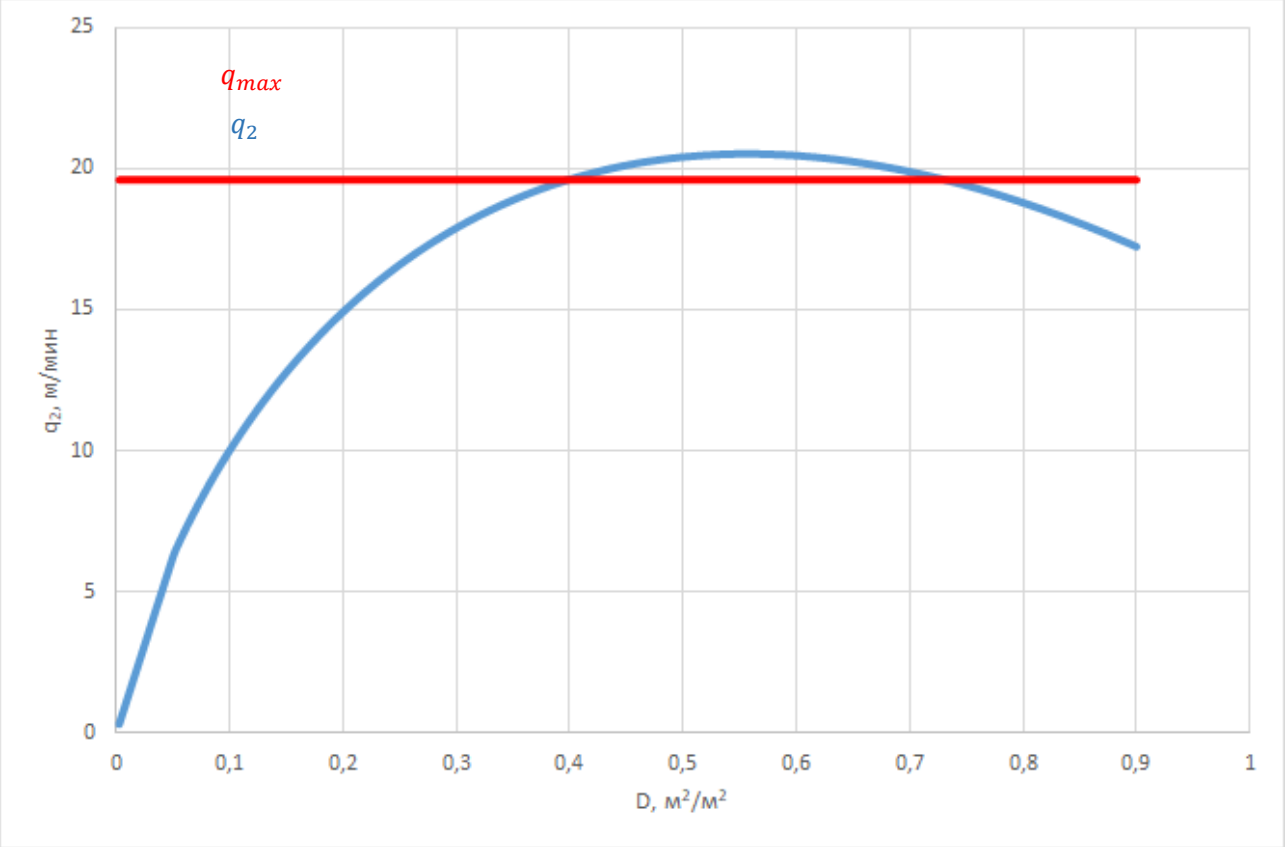

Рис. 11. Зависимость $q_2(D)$ при ширине дверного проема 1,6 м.

На рисунках 12 и 13 показана зависимость $q_2(D)$ при ширине дверного проема 0,8 м и 1,2 м соответственно. Понятно, что зависимость $q_2(D)$ и в этих случаях имеет максимум, но становится равной q_{max} только в одной точке.
Таким образом, условие $q_2 \leq q_{max}$, выбранное разработчиками пособия, определяющее формулу, по которой определять время движения ($t_{Low}(D)$ или $t_{High}(D)$), является не корректным. Правильно использовать условие $D \leq D_{threshold}$. $D_{threshold}$ – минимальная начальная плотность размещения людей, при которой $q_2(D)$ равна q_{max}, и определяется из уравнения:

$$q_2(D_{threshold}) = q_{max} \qquad (6)$$

Уравнение (6) решить аналитически не представляется возможным. Но численными методами возможно найти $D_{threshold}$. В приложении 3 приведены некоторые значения $D_{threshold}$ для различных контингентов людей и соотношения геометрических параметров участков пути.

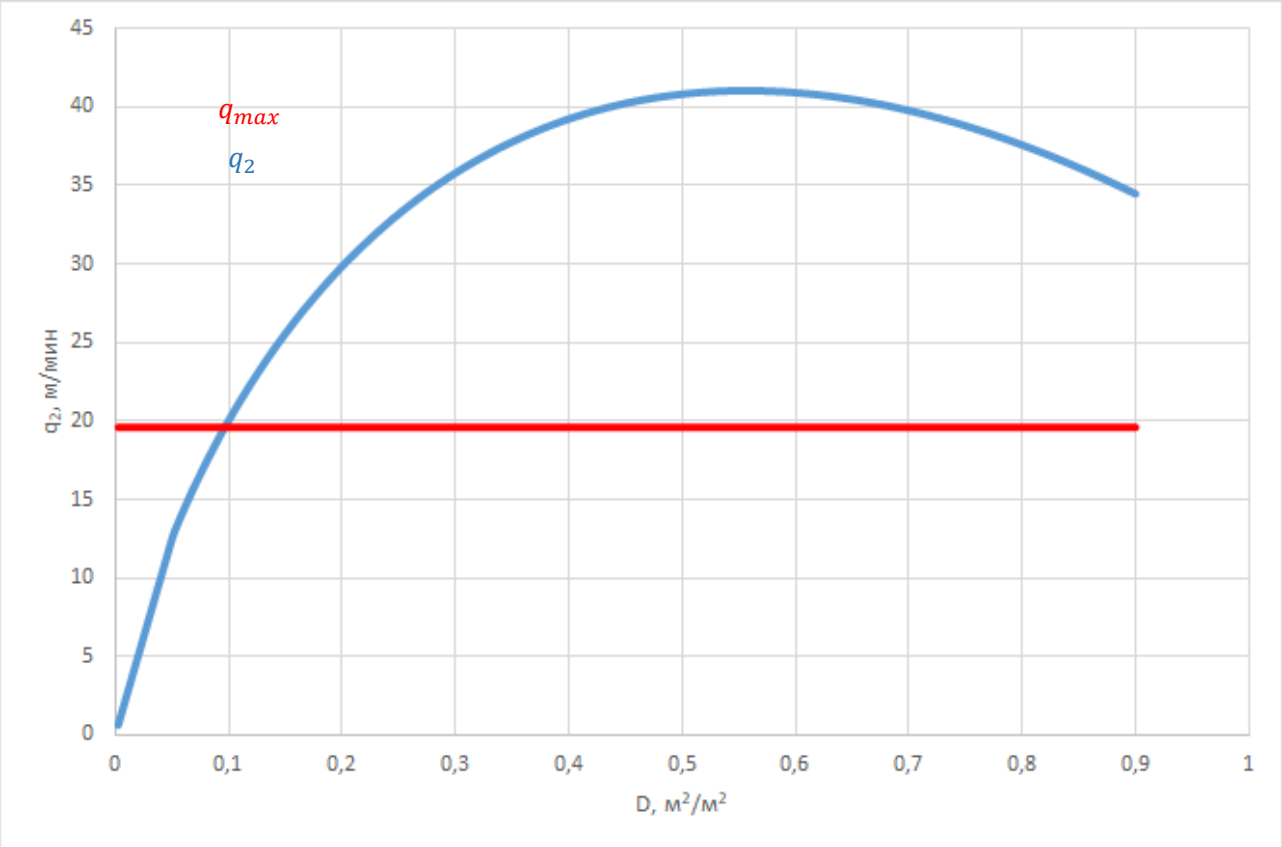

Рис. 12. Зависимость $q_2(D)$ при ширине дверного проема 0,8 м.

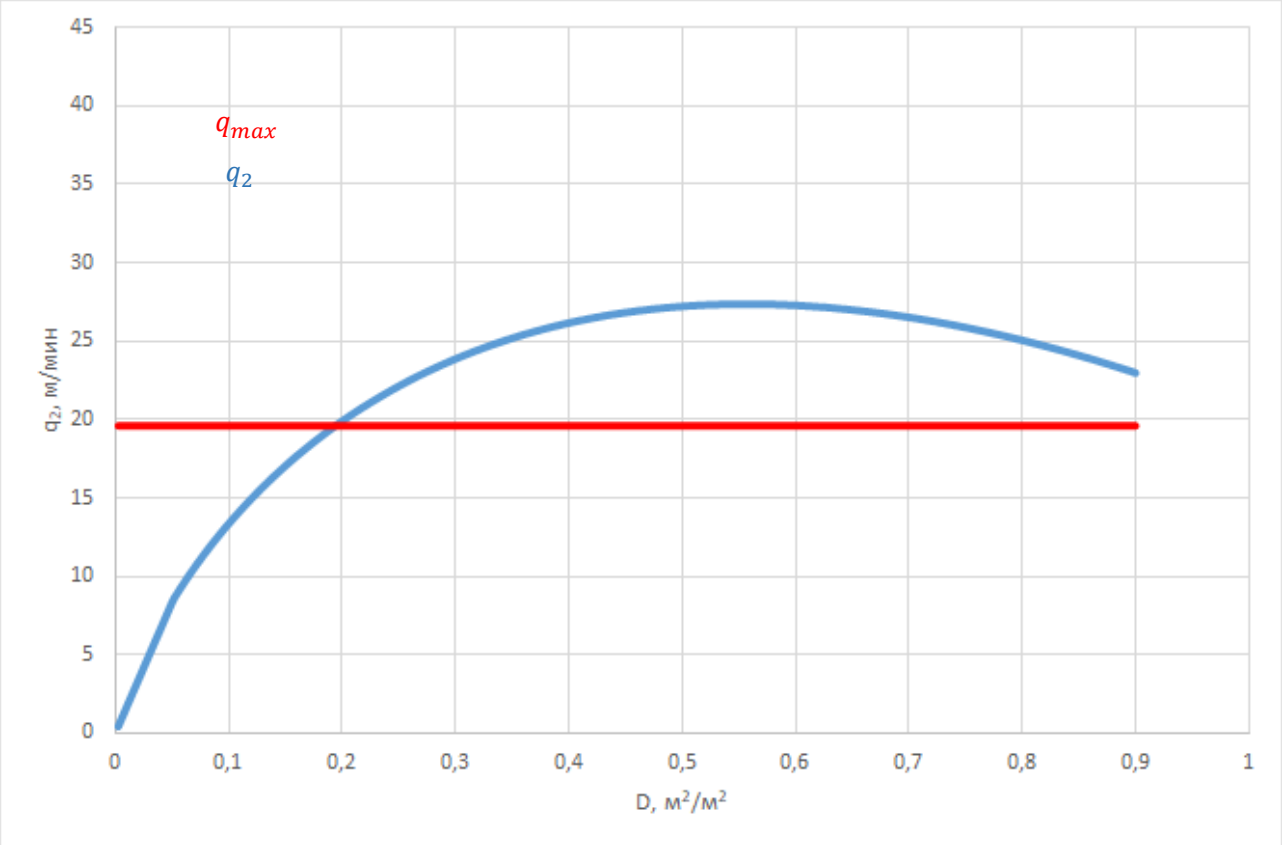

Рис. 13. Зависимость $q_2(D)$ при ширине дверного проема 1,2 м.

Test_905 Движение по горизонтальному участку с дверным проемом шириной 1,2 м

Описание теста

Группа тестов Test_905 полностью совпадает с группой тестов Test_902 за тем лишь исключением, что в тесте Test_905 используется люди контингента «Взрослый человек в зимней одежде». Параметры контингентов людей представлены в приложении 1.

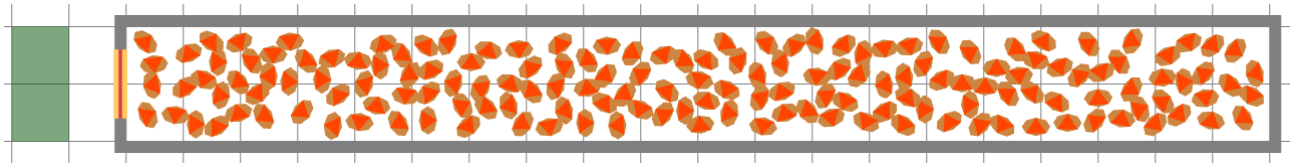

Рис. 14. Тест при начальной плотности 0,5 м^2/м^2.

Ожидаемые результаты

Время движения людей через дверной проем соответствует значению, которое можно рассчитать в соответствии с методикой, предлагаемой в пособии [5].

Ссылка для загрузки тестового проекта

Test_905.fnx

Результаты моделирования

В таблице 5 представлены результаты выполнения тестов и выполнено их сравнение со значениями, предлагаемыми в пособии.

Test ID	Номер теста в пособии	D, м^2/м^2	Время движения, с		Отклонение, %
			Пособие	Fenix+ 3	
Test_905_001	-	0,1	15,00	13,8	-8,0
Test_905_002	-	0,2	57,14	24,6	-56,9
Test_905_003	-	0,3	85,71	47,4	-44,7
Test_905_004	-	0,4	114,29	89,0	-22,1
Test_905_005	-	0,5	142,86	129,4	-9,4
Test_905_006	-	0,6	171,43	160,0	-6,7
Test_905_007	-	0,7	200,00	189,2	-5,4
Test_905_008	-	0,8	228,57	220,4	-3,6
Test_905_009	-	0,9	257,14	249,8	-2,9

Табл. 5. Движение по горизонтальному участку с дверным проемом 1,2 м.

Анализ результатов

Группы тестов Test_902 и Test_905 отличаются контингентом людей. Поэтому, причины отклонения результатов моделирования от значений, предлагаемых в пособии, те же самые, что и в группе тестов Test_902, для которых был выполнен подробный анализ.

Здесь же просто приведем график зависимости $t(D)$ (рис. 15)

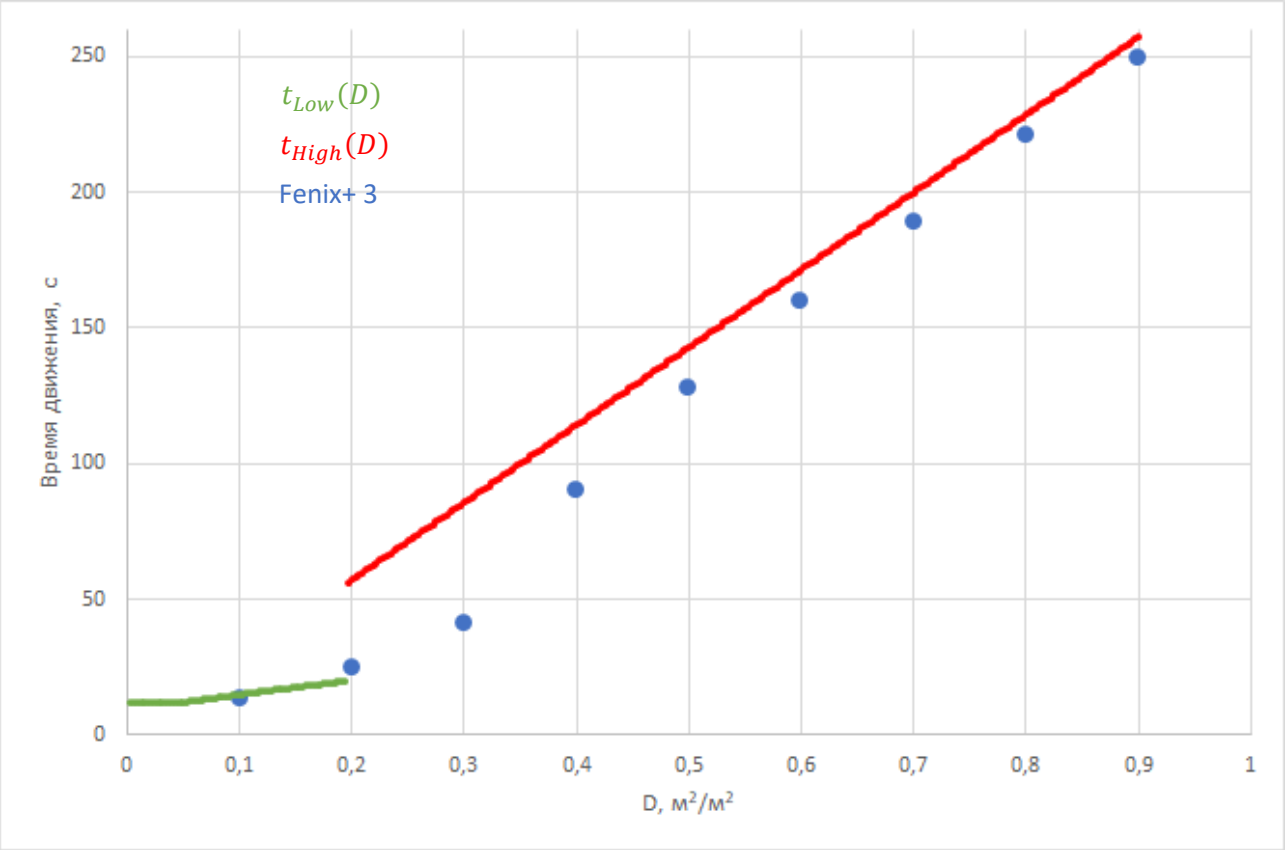

Рис. 15. Зависимость времени движения от начальной плотности размещения людей.

Test_906 Движение по горизонтальному участку с дверным проемом шириной 0,8 м

Описание теста

Группа тестов Test_906 полностью совпадает с группой тестов Test_903 за тем лишь исключением, что в тесте Test_906 используется люди контингента «Взрослый человек в зимней одежде». Параметры контингентов людей представлены в приложении 1.

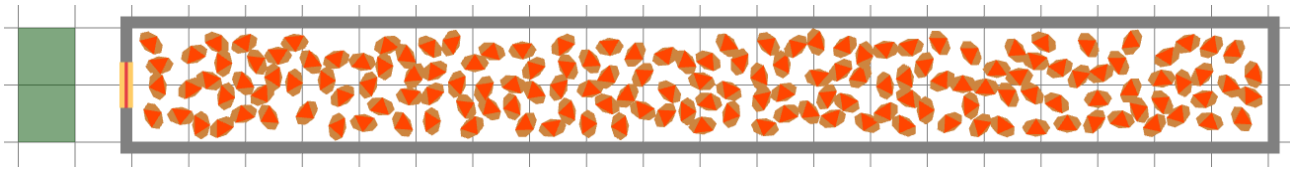

Рис. 16. Тест при начальной плотности 0,5 м^2/м^2.

Ожидаемые результаты

Время движения людей через дверной проем соответствует значению, которое можно рассчитать в соответствии с методикой, предлагаемой в пособии [5].

Ссылка для загрузки тестового проекта

Test_906.fnx

Результаты моделирования

В таблице 6 представлены результаты выполнения тестов и выполнено их сравнение со значениями, предлагаемыми в пособии.

Test ID	Номер теста в пособии	D, м^2/м^2	Время движения, с		Отклонение, %
			Пособие	Fenix+ 3	
Test_906_001	-	0,1	54,55	19,2	-64,8
Test_906_002	-	0,2	109,09	88,2	-19,1
Test_906_003	-	0,3	163,64	142,0	-13,2
Test_906_004	-	0,4	218,18	204,8	-6,1
Test_906_005	-	0,5	272,73	257,2	-5,7
Test_906_006	-	0,6	327,27	314,8	-3,8
Test_906_007	-	0,7	381,82	372,0	-2,6
Test_906_008	-	0,8	436,36	424,6	-2,7
Test_906_009	-	0,9	490,91	478,2	-2,6

Табл. 6. Движение по горизонтальному участку с дверным проемом 0,8 м.

Анализ результатов

Группы тестов Test_906 и Test_903 отличаются контингентом людей. Поэтому, причины отклонения результатов моделирования от значений, предлагаемых в пособии, те же самые, что и в группе тестов Test_903, для которых был выполнен подробный анализ.

Здесь же просто приведем график зависимости $t(D)$ (рис. 17)

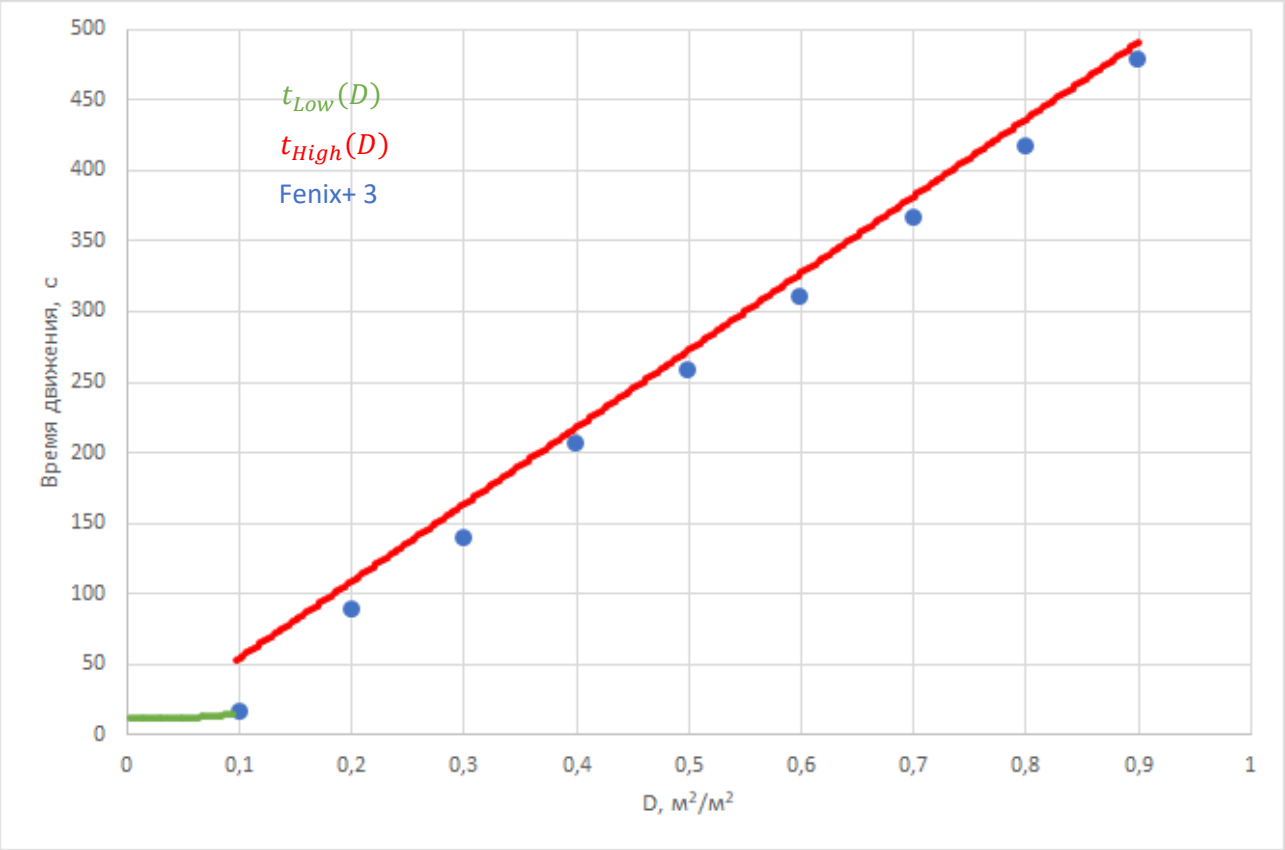

Рис. 17. Зависимость времени движения от начальной плотности размещения людей.

Test_907 Движение по горизонтальному участку с дверным проемом шириной 1,6 м

Описание теста

Группа тестов Test_907 полностью совпадает с группой тестов Test_904 за тем лишь исключением, что в тесте Test_907 используется люди контингента «Взрослый человек в зимней одежде». Параметры контингентов людей представлены в приложении 1.

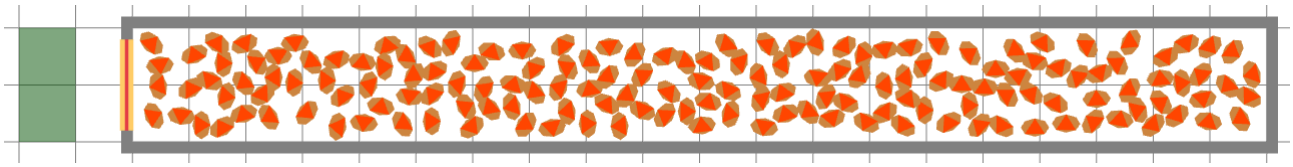

Рис. 18. Тест при начальной плотности 0,5 м^2/м^2.

Ожидаемые результаты

Время движения людей через дверной проем соответствует значению, которое можно рассчитать в соответствии с методикой, предлагаемой в пособии [5].

Ссылка для загрузки тестового проекта

Test_907.fnx

Результаты моделирования

В таблице 7 представлены результаты выполнения тестов и выполнено их сравнение со значениями, предлагаемыми в пособии.

Test ID	Номер теста в пособии	D, м^2/м^2	Время движения, с		Отклонение, %
			Пособие	Fenix+ 3	
Test_907_001	-	0,1	14,97	13,2	-11,8
Test_907_002	-	0,2	20,10	23,6	17,4
Test_907_003	-	0,3	25,14	33,4	32,9
Test_907_004	-	0,4	70,59	40,6	-42,5
Test_907_005	-	0,5	88,24	49,6	-43,8
Test_907_006	-	0,6	105,88	99,0	-6,5
Test_907_007	-	0,7	123,53	120,0	-2,9
Test_907_008	-	0,8	63,85	137,0	114,6
Test_907_009	-	0,9	78,34	155,0	97,9

Табл. 7. Движение по горизонтальному участку с дверным проемом 1,6 м.

Анализ результатов

Группы тестов Test_907 и Test_904 отличаются контингентом людей. Поэтому, причины отклонения результатов моделирования от значений, предлагаемых в пособии, те же самые, что и в группе тестов Test_904, для которых был выполнен подробный анализ.

Здесь же просто приведем график зависимости $t(D)$ (рис. 19)

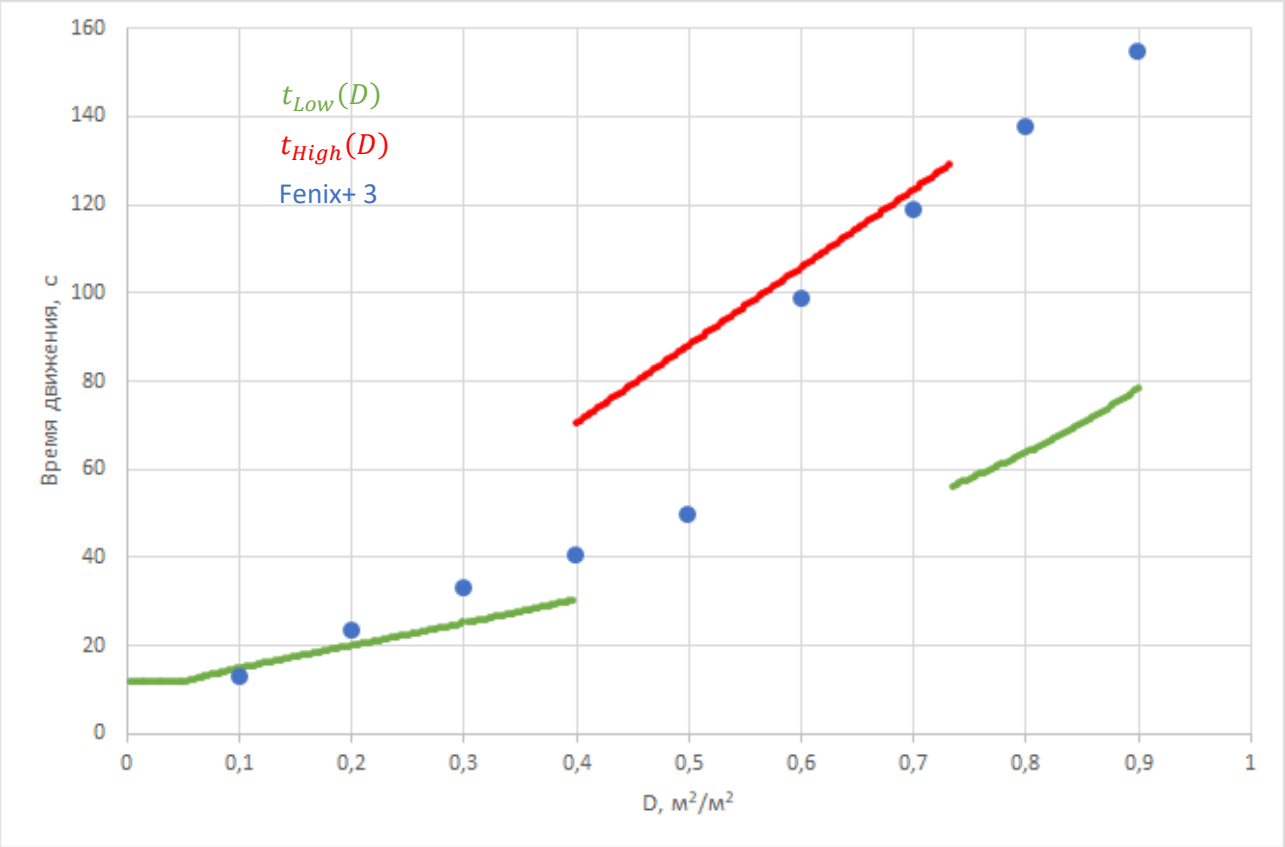

Рис. 19. Зависимость времени движения от начальной плотности размещения людей.

Test_908 Слияние людских потоков на горизонтальном участке

Описание теста

Схема теста показана на рисунке 20.

Сценарий представляет Т-образный перекресток двух коридоров шириной 2 м и длиной 10 м. После перекрестка общий участок шириной 1,7 м и длиной 5 м. В коридорах размещаются люди с разной начальной плотностью. Контингент всех людей «Взрослый человек в летней одежде». Параметры контингентов людей представлены в приложении 1. Время начала движения всех людей равно нулю. Более детально с описанием теста можно ознакомиться в пособии [5].

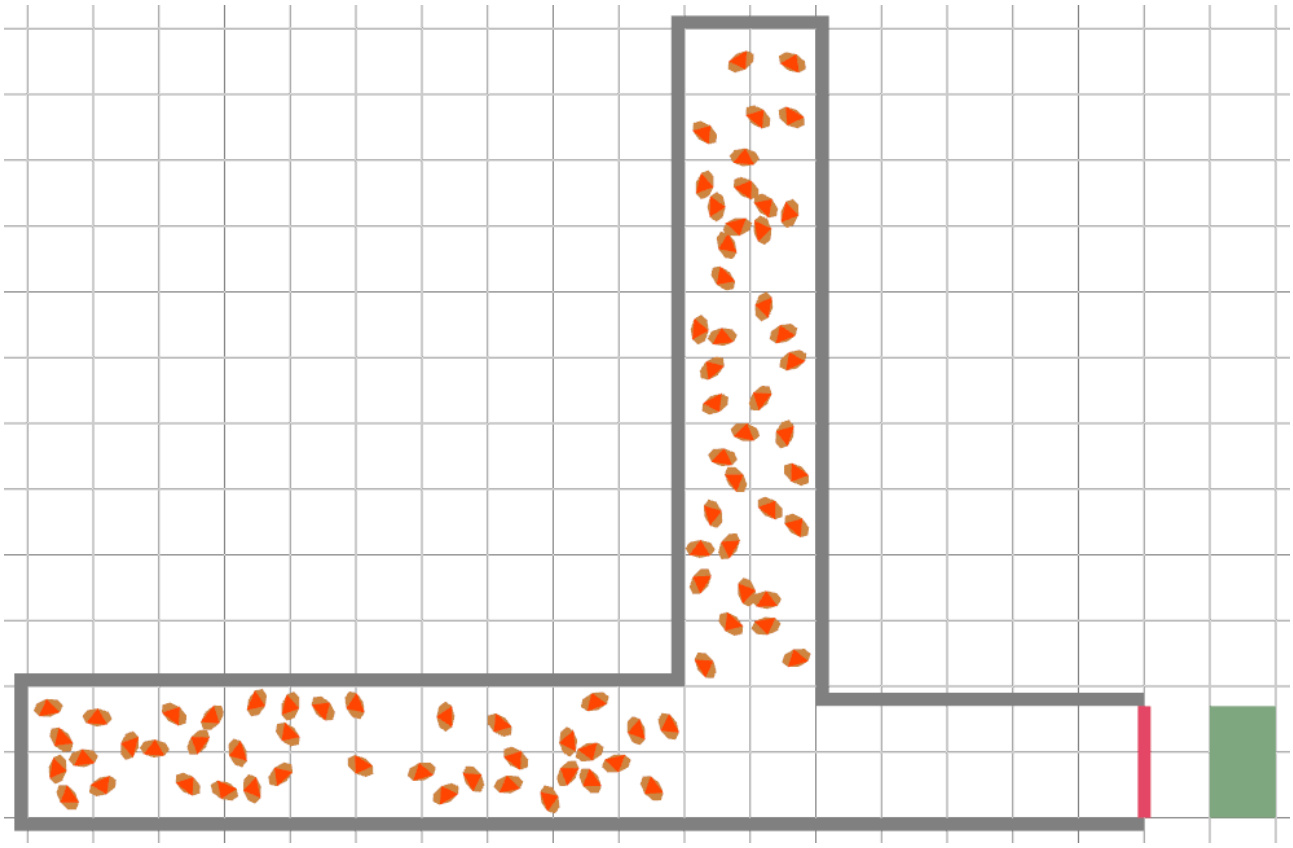

Рис. 20. Слияние людских потоков на горизонтальном участке.

Ожидаемые результаты

Время движения людей соответствует значению, предлагаемому в пособии [5].

Ссылка для загрузки тестового проекта

Test_908.fnx

Результаты моделирования

В таблице 8 представлены результаты моделирования.

Test ID	Номер теста в пособии	Время движения, с		Отклонение, %
		Пособие	Fenix+	
Test_908_001	28-2	28,42	31,4	10,5
Test_908_002	29-2	38,87	43,6	12,2
Test_908_003	30-2	49,33	55,8	13,1
Test_908_004	31-2	59,79	67,8	13,4
Test_908_005	32-2	70,25	78,8	12,2
Test_908_006	33-2	80,70	90,8	12,5
Test_908_007	34-2	91,16	104,0	14,1
Test_908_008	35-2	101,62	114,0	12,2
Test_908_009	36-2	28,42	31,4	10,5
Test_908_010	37-2	38,87	44,0	13,2
Test_908_011	38-2	49,33	56,0	13,5
Test_908_012	39-2	59,79	68,4	14,4
Test_908_013	40-2	70,25	79,8	13,6
Test_908_014	41-2	80,70	91,0	12,8
Test_908_015	42-2	91,16	102,6	12,5

Табл. 8. Слияние людских потоков на горизонтальном участке.

Анализ результатов

Результаты моделирования всех тестов хорошо соответствуют значениям, предлагаемым в пособии [5]. Ни для одного теста отклонение не превышает 15%.

Заключение и выводы

Возможности программы Fenix+ 3 позволяют выполнить все тесты, предлагаемые в пособии [5] (всего 42 теста).

Отклонение результатов моделирования от данных, приведенных в пособии [5], составило меньше 10% для 42% тестов. Отклонение до 10% авторы пособия [5] считают допустимым для рассматриваемых тестов.
Для 65% тестов отклонение составляет менее 15%.

Кроме того, дополнительно разработаны и выполнены 36 тестов (группы тестов Test_904 – Test_907). Дополнительные тесты рассматривают те же схемы, что и в пособии [5], но для более широкого диапазона условий. С помощью них демонстрируются некоторые аспекты применения предлагаемой в пособии [5] методики, которые не освещены в самом пособии.

Проведен подробный анализ выполненных тестов и выявлены причины наибольших отклонений.

Показано, что:

1. Методика определения «эталонного» времени движения, предлагаемая в пособии [5], применима для упрощенной аналитической модели на всем интервале плотностей начального размещения людей.
2. Для имитационно-стохастической модели и индивидуально-поточных моделей методика применима лишь для малых и больших плотностей начального размещения людей.
3. Методика требует доработки с целью уточнения «эталонного» времени движения для имитационно-стохастической и индивидуально-поточных моделей для «средних» плотностей начального размещения людей.

Предложен вариант уточнения методики определения «эталонного» времени движения для «средних» плотностей начального размещения людей (см. приложение 2).

Приложение 1. Параметры контингентов людей

Связь между скоростью движения людей в потоке $V(D)$ и его плотностью D определяется формулой [3]:

$$V(D) = \begin{cases} V_0 & \text{, если } D \leq D_0 \\ V_0\left(1 - a\ ln\frac{D}{D_0}\right) & \text{, если } D > D_0 \end{cases} \qquad (П.1)$$

где:

V_0 – скорость свободного движения (при отсутствии влияния окружающих людей),

D_0 – пороговое значение плотности потока, по достижении которого плотность становится фактором, влияющим на скорость движения,

a – коэффициент, определяющий степень влияния плотности потока.

В таблице П1.1 показаны значения параметров V_0, D_0 и a в зависимости от контингента людей и вида пути, по которому движется поток людей.

Контингент	Параметр	Горизонтальный путь	Лестница вниз	Лестница вверх	Пандус вниз	Пандус вверх
Взрослый человек в весенне-осенней одежде (f=0,113 м²)	V_o, м/мин	100	100	60	115	80
	D_o, чел/м²	0,451	0,788	0,593	1,513	0,947
	a	0,295	0,4	0,305	0,399	0,399
Взрослый человек в летней одежде (f=0,1 м²)	V_o, м/мин	100	100	60	115	80
	D_o, чел/м²	0,51	0,89	0,67	1,71	1,07
	a	0,295	0,4	0,305	0,399	0,399
Взрослый человек в зимней одежде (f=0,125 м²)	V_o, м/мин	100	100	60	115	80
	D_o, чел/м²	0,408	0,712	0,536	1,368	0,856
	a	0,295	0,4	0,305	0,399	0,399
Слепые и слабовидящие люди (f=0,1 м²)	V_o, м/мин	26	21	18	-	-
	D_o, чел/м²	0,73	0,97	0,82	-	-
	a	0,371	0,519	0,387	-	-
Дети с ограниченными возможностями (f=0,15 м²)	V_o, м/мин	51	23	20	-	-
	D_o, чел/м²	0,6	0,63	0,69	-	-
	a	0,29	0,21	0,3	-	-
Дети дошкольного возраста (f=0,03 м²)	V_o, м/мин	60	47	47	-	-
	D_o, чел/м²	0,78	0,64	0,76	-	-
	a	0,275	0,19	0,275	-	-
Глухие и слабослышащие люди (f=0,1 м²)	V_o, м/мин	82	82	54	-	-
	D_o, чел/м²	0,58	0,91	0,72	-	-
	a	0,301	0,38	0,344	-	-
М1 (f=0,1 м²)	V_o, м/мин	100	100	60	115	80
	D_o, чел/м²	0,51	0,89	0,67	1,71	1,07
	a	0,295	0,4	0,305	0,399	0,399
М2 (f=0,2 м²)	V_o, м/мин	30	30	20	45	25
	D_o, чел/м²	0,675	0,695	0,63	0,855	0,73
	a	0,335	0,346	0,348	0,438	0,384
М3	V_o, м/мин	70	20	25	105	55

(f=0,3 м²)	D_o, чел/м²	0,34	0,693	0,4	0,407	0,453
	a	0,35	0,454	0,347	0,416	0,446
M4 (f=0,96 м²)	V_o, м/мин	60	-	-	115	40
	D_o, чел/м²	0,141	-	-	0,152	0,156
	a	0,4	-	-	0,424	0,42
Престарелые люди (f=0,2 м²)	V_o, м/мин	25	20	20	25	15
	D_o, чел/м²	0,96	1,26	0,56	0,58	0,72
	a	0,428	0,505	0,338	0,353	0,368
Люди в стационарах больниц (f=0,2 м²)	V_o, м/мин	44	24	14	-	-
	D_o, чел/м²	0,77	0,96	0,75	-	-
	a	0,414	0,422	0,313	-	-
Беременные женщины (f=0,13 м²)	V_o, м/мин	30	20	25	-	-
	D_o, чел/м²	-	-	-	-	-
	a	-	-	-	-	-

Табл. П1.1.

Видно, что для некоторых контингентов людей отсутствует информация о параметрах движения по некоторым типам пути. Например, для контингента «Беременные женщины» отсутствует информация о движении по пандусам. Но, разумеется, беременные женщины могут передвигаться по пандусам. Поэтому, в случае движения по пути, для которого параметры не известны, программа Fenix+ 3 использует параметры движения того пути, для которого V_0 минимальна. Поэтому, беременные женщины по пандусам (не важно, вверх или вниз) будут идти так же, как и по лестнице вниз.
Исключением является контингент «M4» (инвалиды, перемещающиеся на колясках) – они не могут двигаться по лестницам.

Приложение 2. Вариант совершенствования методики определения «эталонного» времени движения, предложенного в пособии [5]

Предлагаемый вариант определения «эталонного» времени движения применим для тестов движения через дверной проем (группы тестов Test_902 - Test_907).

Как было показано при анализе результатов выполнения теста Test_902 (см. рисунок 4), если время движения рассчитывать по формуле (1), то зависимость $t(D)$ имеет разрыв.

$$t(D) = \begin{cases} t_{Low}(D), \text{если } q_2 \leq q_{max} \\ t_{High}(D), \text{если } q_2 > q_{max} \end{cases} \qquad (1)$$

Вблизи точки разрыва ($D=D_{threshold}$) зависимости $t_{Low}(D)$ и $t_{High}(D)$ неприменимы.

В качестве альтернативного способа определения времени движения может использоваться следующая зависимость:

$$t(D) = \alpha_{Low}(D) \cdot t_{Low}(D) + \alpha_{High}(D) \cdot t_{High}(D) \qquad (7)$$

где $\alpha_{Low}(D)$ и $\alpha_{High}(D)$ – коэффициенты, зависящие от плотности и определяющие вклад каждого слагаемого. При этом коэффициенты должны удовлетворять требованиям:

$$\lim_{D\to 0} \alpha_{Low}(D) = 1 \qquad \lim_{D\to \infty} \alpha_{Low}(D) = 0 \qquad (8)$$

$$\lim_{D\to 0} \alpha_{High}(D) = 0 \qquad \lim_{D\to \infty} \alpha_{High}(D) = 1 \qquad (9)$$

Конкретные функции, которые определяют коэффициенты $\alpha_{Low}(D)$ и $\alpha_{High}(D)$ могут быть различны. Кроме условий (8) и (9) функции $\alpha_{Low}(D)$ и $\alpha_{High}(D)$ должны быть непрерывны на всем интервале плотностей.
Чтобы ограничить набор возможных функций, введем дополнительные ограничения:

$$\alpha_{Low}(D) = 1 - \alpha_{High}(D) \qquad (10)$$

$$t(D_{threshold}) = \frac{\alpha_{Low}(D_{threshold}) + \alpha_{High}(D_{threshold})}{2} \qquad (11)$$

Можно показать, что с учетом этих допущений:

$$\alpha_{High}(D_{threshold}) = 0{,}5 \qquad (12)$$

В качестве функции, удовлетворяющей всем вышеперечисленным условиям, можно выбрать следующую:

$$\alpha_{High}(D) = \frac{1 + th\left(\frac{D - D_{threshold}}{\Delta D}\right)}{2} \qquad (13)$$

где ΔD – окрестность $D_{threshold}$, где происходит основной переход от $t_{Low}(D)$ к $t_{High}(D)$. Чем меньше значение ΔD, тем быстрее происходит переход от зависимости $t_{Low}(D)$ к $t_{High}(D)$. Очень быстрого перехода между зависимостями, по всей видимости, быть не должно.

На рисунке П2.1 показаны те же данные, что и на рисунке 4 и, кроме того, добавлен график зависимости $t(D)$, определяемой формулой (7) при $\Delta D = 0{,}1\ \text{м}^2/\text{м}^2$.

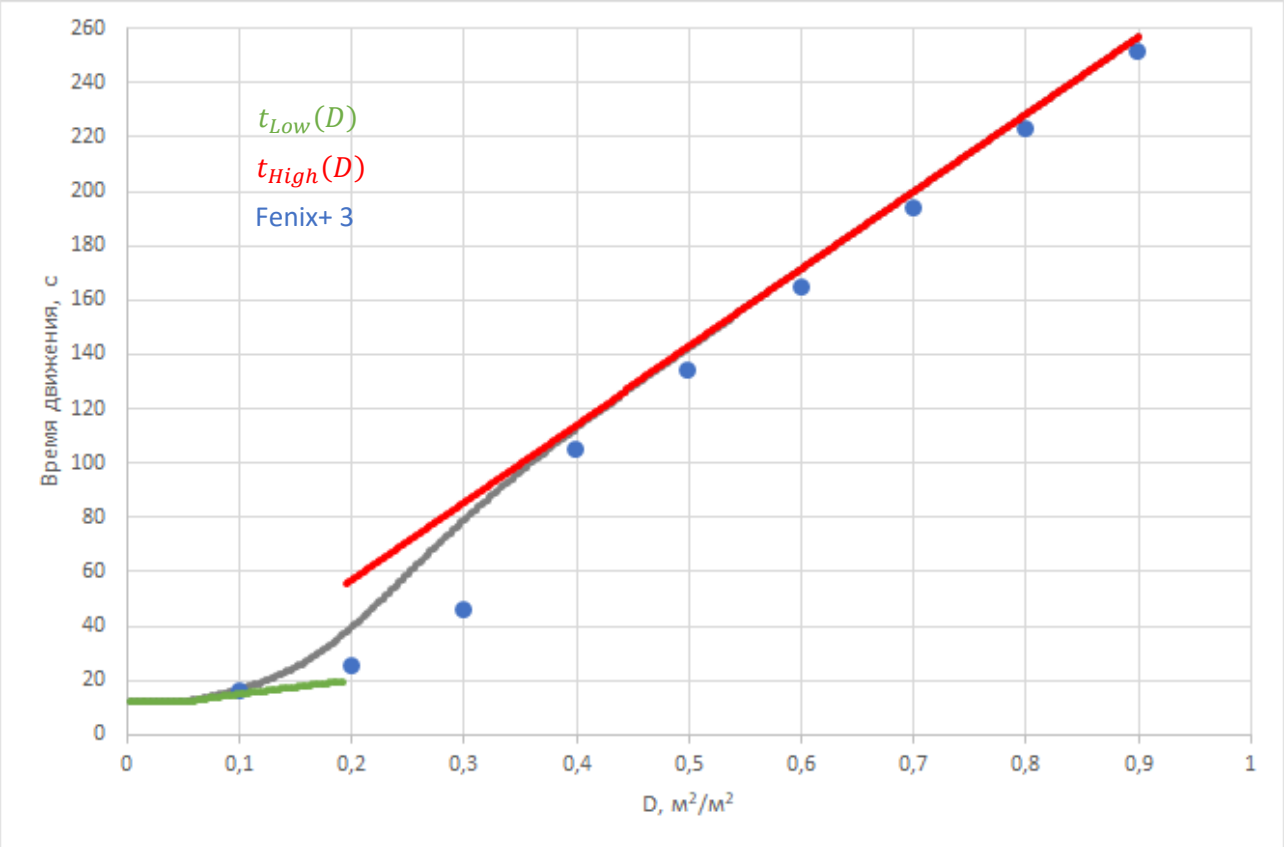

Рис. П2.1. $\Delta D = 0{,}1\ \text{м}^2/\text{м}^2$

На рисунке П2.2 показаны те же данные, что и на рисунке 4 и, кроме того, добавлен график зависимости $t(D)$, определяемой формулой (7) при $\Delta D = 0{,}02\ \text{м}^2/\text{м}^2$. Видно, что переход от одного граничного значения к другому происходит значительно быстрее чем при $\Delta D = 0{,}1\ \text{м}^2/\text{м}^2$.

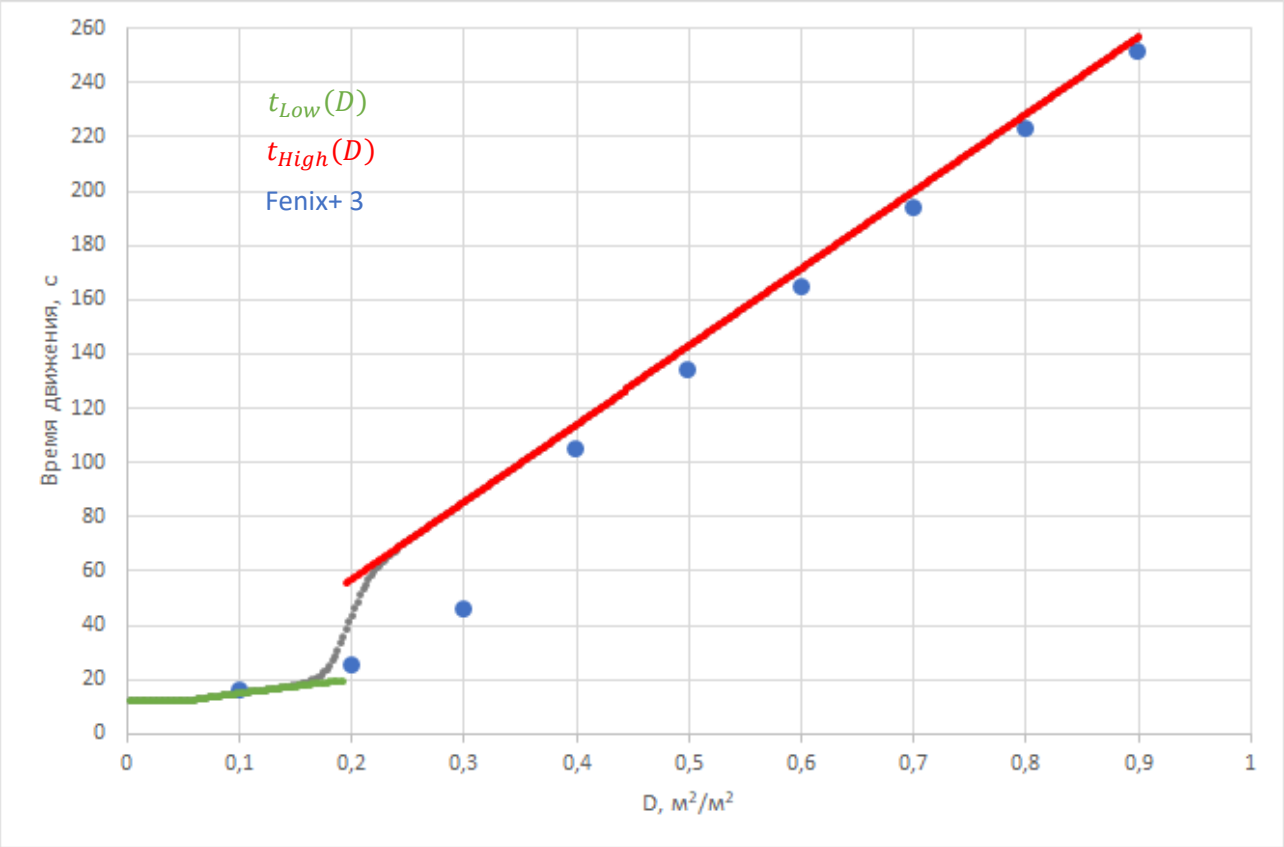

Рис. П2.2. $\Delta D = 0{,}02\ \text{м}^2/\text{м}^2$

Приложение 3. Значение $D_{threshold}$ для некоторых контингентов людей

b_2/b_1	Взрослый человек в летней одежде	Взрослый человек в зимней одежде	Дети дошкольного возраста	Престарелые люди	Глухие и слабослышащие люди	Слепые и слабовидящие люди
0,05	0,006	0,006	0,014	0,020	0,007	0,028
0,10	0,014	0,014	0,038	0,050	0,018	0,077
0,15	0,024	0,024	0,070	0,088	0,030	0,159
0,20	0,035	0,035	0,117	0,137	0,044	
0,25	0,048	0,048	0,198	0,199	0,061	
0,30	0,063	0,063		0,281	0,079	
0,35	0,079	0,079		0,400	0,100	
0,40	0,097	0,097			0,124	
0,45	0,117	0,117			0,151	
0,50	0,139	0,139			0,182	
0,55	0,165	0,165			0,219	
0,60	0,194	0,194			0,263	
0,65	0,228	0,228			0,319	
0,70	0,270	0,270			0,398	
0,75	0,322	0,322				
0,80	0,398	0,398				

Табл. П3.1. Значение $D_{threshold}$ для некоторых контингентов людей.

Приложение 4. Метод определения отклонения

Отклонение результатов моделирования от «эталонного» значения определяется по формуле (14):

$$\delta = \frac{t_{\text{М}} - t_{\text{Э}}}{t_{\text{Э}}} \cdot 100\% \qquad (14)$$

где:

δ – отклонение результатов моделирования от «эталона»;

$t_{\text{М}}$ – время движения людей, полученное в результате моделирования с помощью программы;

$t_{\text{Э}}$ – «эталонное» время движения людей, полученное по методике, предлагаемой в пособии [5].

Список литературы

1. Приложение к Приказу МЧС России № 382 от 30.06.2009г. «Методика определения расчетных величин пожарного риска в зданиях, сооружениях и пожарных отсеках различных классов функциональной пожарной опасности».
2. Приложение к Приказу МЧС России № 404 от 10.07.2009г «Методика определения расчетных величин пожарного риска на производственных объектах».
3. Холщевников В. В., Самошин Д. А. Эвакуация и поведение людей при пожарах: Учебное пособие. — М.: Академия ГПС, 2015. —262 С.
4. Руководство пользователя Fenix+ 3: https://mst.su/docs/fenixplus3/userguide/ (проверено 2022.11.01)
5. Тестовые задачи для проверки точности моделирования времени эвакуации людей в случае пожара: учеб.-метод. пособие. Часть 1 / В. В. Холщевников, Д. А. Самошин Р. Н. Истратов, М. М. Шаранова. – М.: Академия ГПС МЧС России, 2019. – 26 с.
6. Д.А. Самошин Расчет времени эвакуации людей. Проблемы и перспективы., Пожаровзрывобезопасность, 2004, №1.
7. Холщевников В.В., Парфененко А.П. Корректность компьютерной модели и наша жизнь. Пожаровзрывобезопасность/Fire and Explosion Safety. 2020; 29(3): 66-94. https://doi.org/10.22227/PVB.2020.29.03.66-94