



**Моделирование эвакуации при пожаре с применением ПО «Сигма ПБ»**

к.ф.-м.н. Кирик Екатерина Сергеевна

ИВМ СО РАН, ООО «3к-эксперт», [info@3ksigma.ru](mailto:info@3ksigma.ru)

- многофункциональные торговые, спортивные и др. сооружения
- атриумы, галереи, многоэтажные, разноуровневые здания
- разнородный контингент по группам мобильности (скорость, площадь проекции)
- медицинские учреждения

- дымоудаление и подпор воздуха,
- доводчики (устройства для самозакрывания дверей),
- системы оповещения и управления эвакуацией СОУЭ (поэтапная эвакуация),
- объемно-планировочное решение

Применение вариативного моделирования позволяет изучить влияние различных объемно-планировочных решений на исход эвакуации при пожаре ->

найти **оптимальный вариант по цене и качеству**



- выполнение расчетов

- \* распространения опасных факторов пожара и

- \* эвакуации

из *многоэтажных* зданий, сооружений и пожарных отсеков различных классов функциональной пожарной опасности;

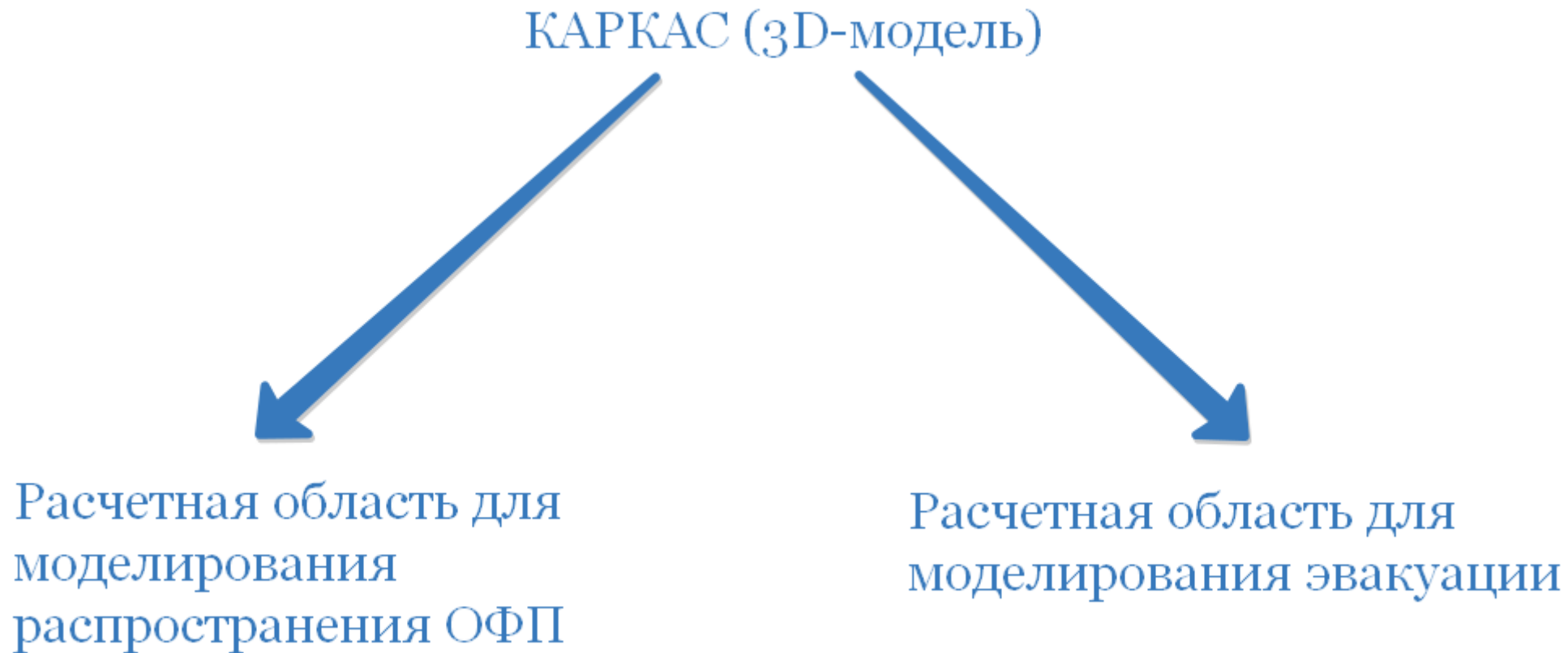
- определение вероятности эвакуации из здания (Ф1-Ф5);

- определение расчетной величины пожарного риска

1. Построитель 3D модели здания  
(+подложка, +импорт модели здания из Revit)  
(расчетные области для моделирования пожара и эвакуации)
2. Редактор сценариев пожара
3. Редактор сценариев эвакуации
4. Модуль, реализующий расчет развития пожара  
(полевая модель)
5. Модуль, реализующий расчет эвакуации людей  
(индивидуально-поточная модель)
6. Модуль 3D-визуализации, анализа, определения времен эвакуации и блокирования путей эвакуации, вероятности эвакуации, формирования отчетов

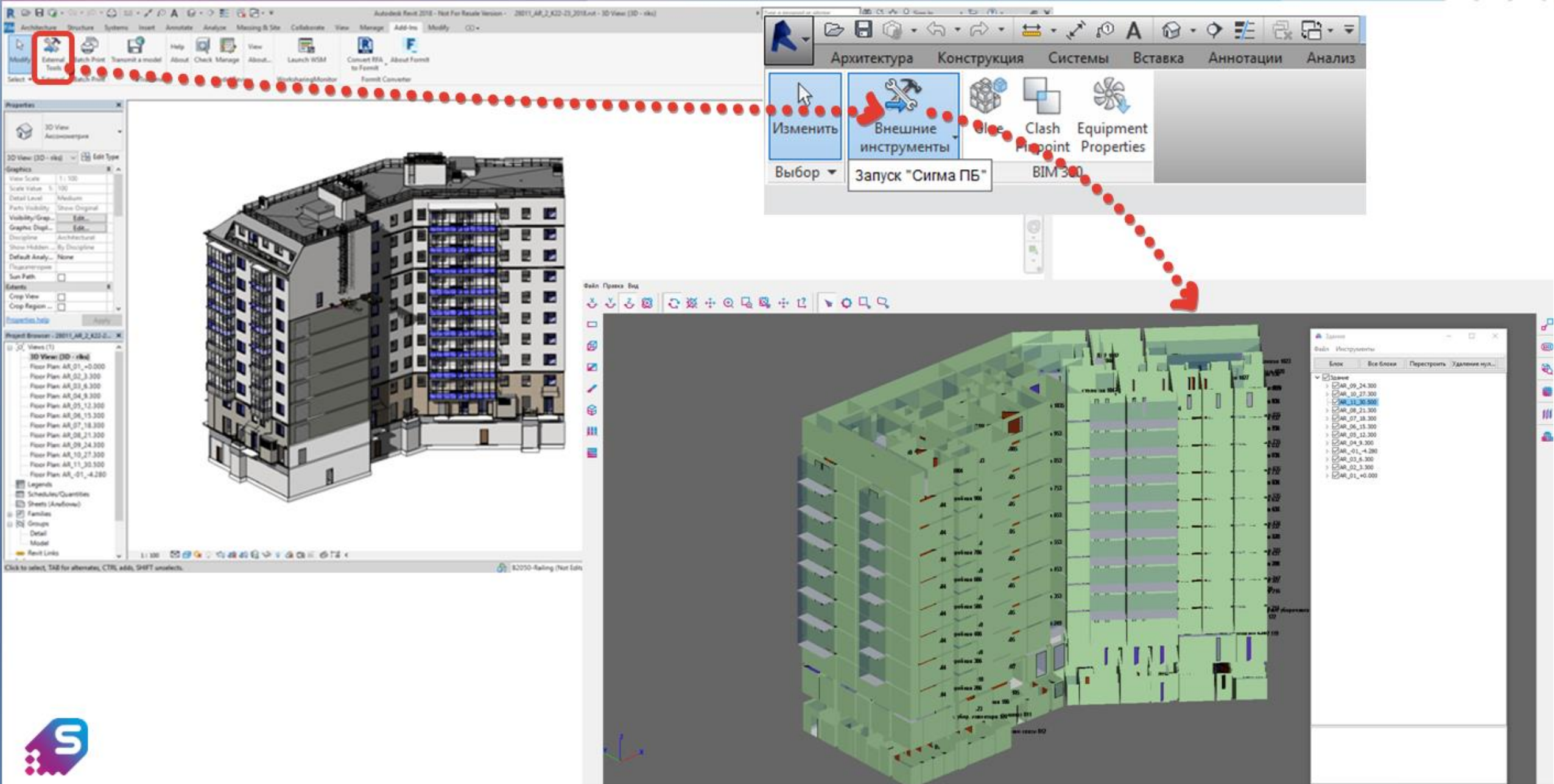
- единая 3D-модель, на основе которой создаются расчетные области для моделирования эвакуации и распространения ОФП -> гибкая постановка задач
- возможность импортировать модель здания из Revit
- собственные расчетные модули (ОФП, эвакуация)
- совместная 3D-визуализация эвакуации и распространения ОФП
- автоматическое расставление контрольных точек по пути эвакуации
- автоматический анализ результатов расчета  
(времена эвакуации и блокирования участков, вероятность эвакуации)
- одновременная работа над одним проектом (построение 3D-модели) в «несколько рук»
- одновременный расчет (ОФП) нескольких сценариев







# 3D-модель: импорт модели здания из Revit





## Неортогональные блочно-структурированные сетки:

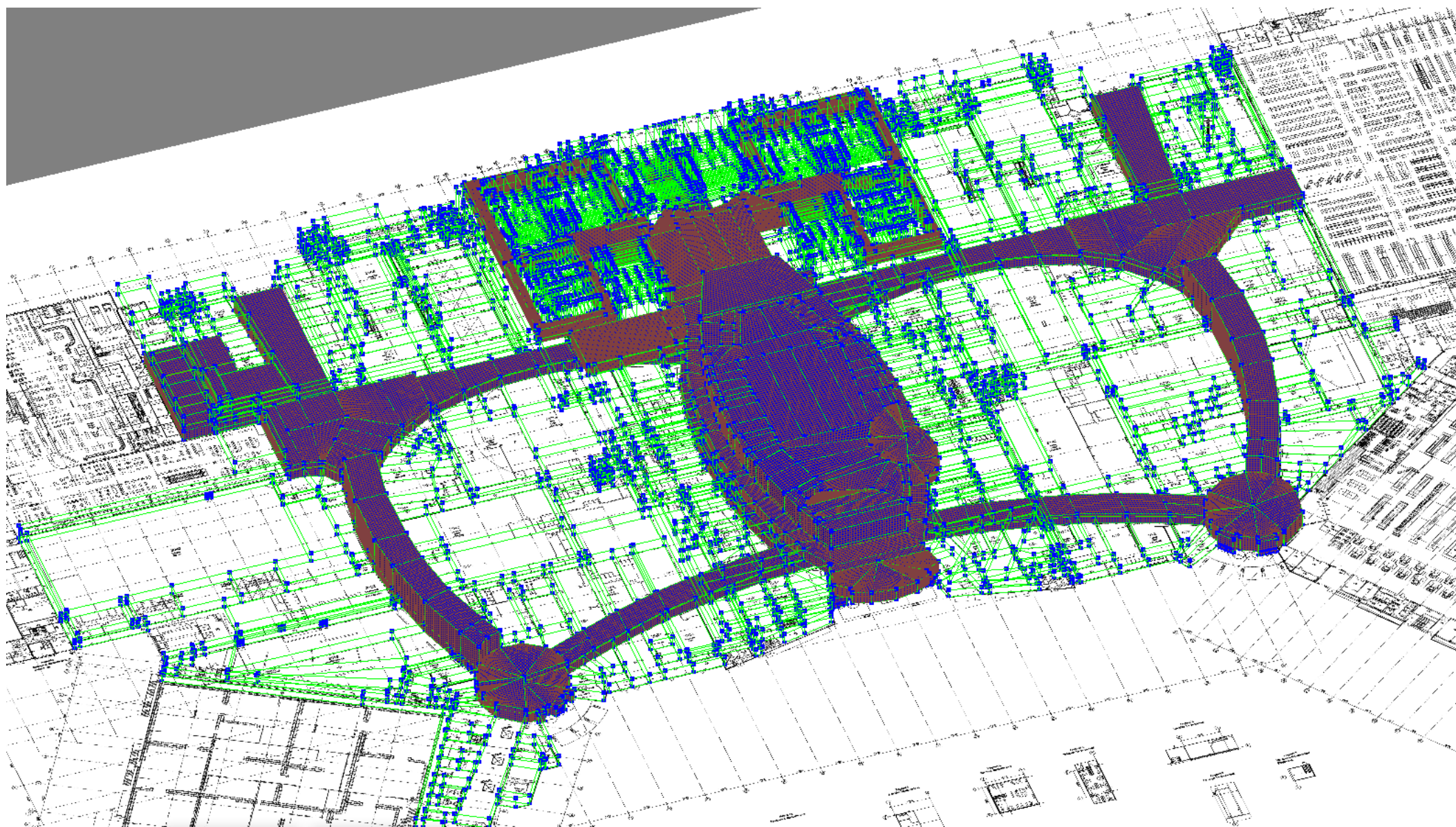
- расчетная область состоит из связанных блоков выпуклой формы (шестигранники);
- блоки «заливаются» сеткой в границах внешнего контура с заданным характерным шагом



Заданные геометрические **размеры в 3D-модели здания не изменяются при дискретизации** расчетной области (создании сетки) и проведении численного моделирования развития пожара

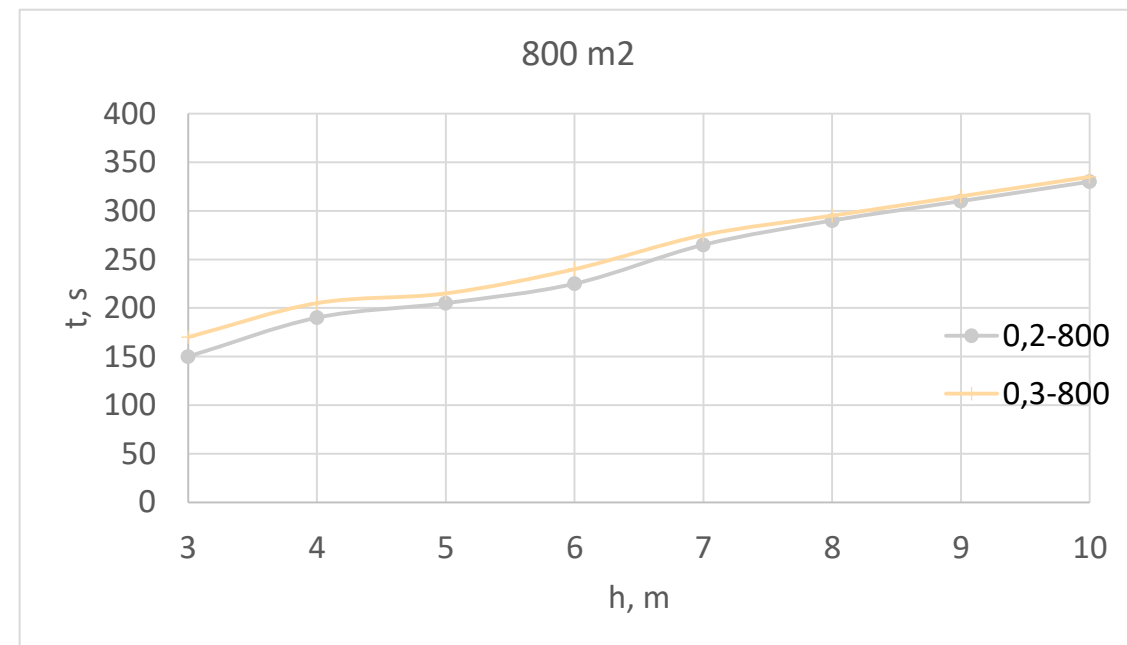
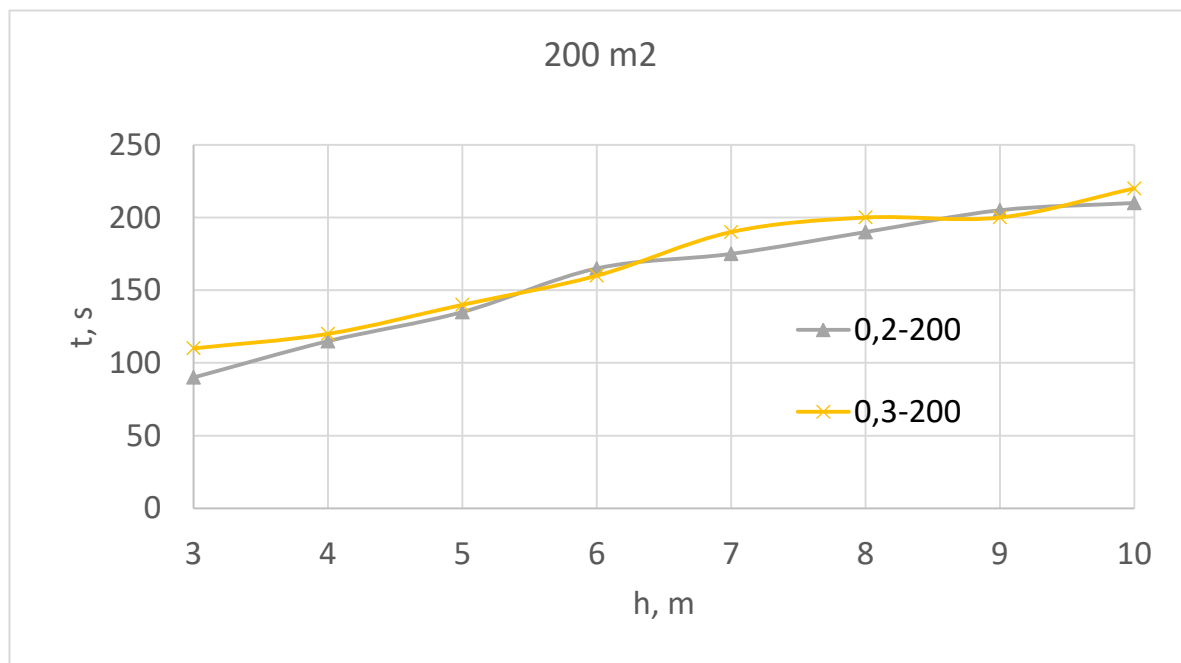






# ОСОБЕННОСТИ ЧИСЛЕННОГО РЕШЕНИЯ

- использование экономичных **URANS**-моделей турбулентности позволяет предъявлять **пониженные требования к вычислительным характеристикам персонального компьютера** (по сравнению с использованием LES, гибридных LES/RANS, DES моделей турбулентности), характерный размер шага дискретизации от 0,2 м (в помещении очага пожара) до 1 м на существенном удалении от очага пожара;



[https://3ksigma.ru/wp-content/uploads/2017/12/technik\\_manual\\_v2017\\_Sigma.pdf](https://3ksigma.ru/wp-content/uploads/2017/12/technik_manual_v2017_Sigma.pdf)



## Постановка задачи

- Область моделирования  $\Omega \in R^2$  и ее граница  $\partial\Omega$
- Начальные координаты людей, площадь проекции  

$$x_i(0) = (x_i^1(0), x_i^2(0)), i = \overline{1, N}$$
- Скорость свободного движения каждого человека  

$$v_i^0, i = \overline{1, N}$$
- Цель движения
- Время начала эвакуации

## Уравнение движения

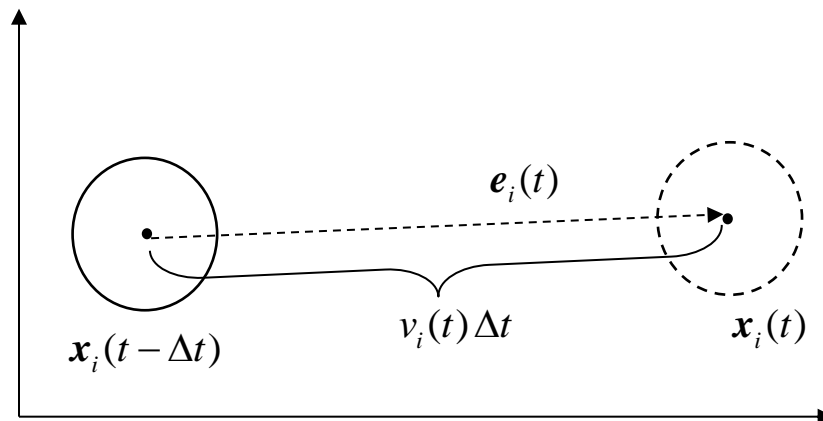
$$\mathbf{x}_i(t) = \mathbf{x}_i(t - \Delta t) + v_i(t) \mathbf{e}_i(t) \Delta t, \quad i = \overline{1, N} \quad (1)$$

$\mathbf{x}_i(t - \Delta t)$ , [м] – координата центра в предыдущий момент времени;

$\mathbf{e}_i(t)$  – направление перемещения;

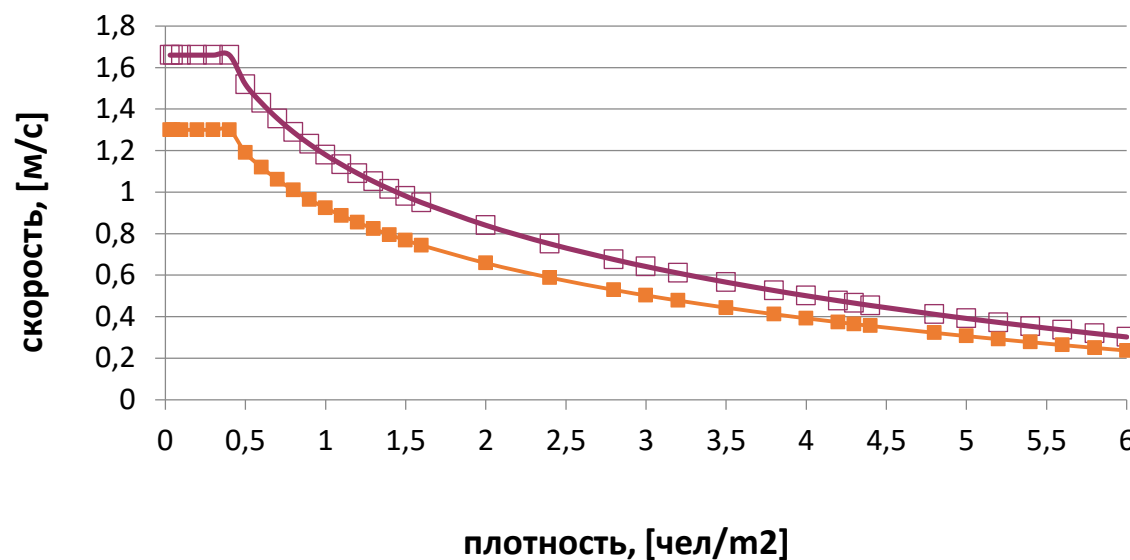
$v_i(t)$ , [м/с] – скорость человека, функция локальной плотности;

$\Delta t = 0.25$ , [с] – временной шаг





$$v_i(t) = \begin{cases} v_i^0 (1 - a \ln \frac{F(r_\alpha^*)}{F^0}), & F(r_\alpha^*) > F^0; \\ v_i^0, & F(r_\alpha^*) \leq F^0, \end{cases}$$



Беляев С. В. Эвакуация зданий массового назначения. – М.: Изд. Всесоюзной академии архитектуры, 1938.

Предтеченский В. М., Милинский А. И. Проектирование зданий с учетом организации движения людских потоков. – М.: Изд. лит. по строительству, 1969; Berlin, 1971; Koln, 1971; Praha, 1972; U.S., New Delhi, 1978.

Изд. 2. – М.: Стройиздат, 1979.

Холщевников В. В., Самошин Д. А., Исаевич И. И. Натурные наблюдения людских потоков: учебное пособие. – М.: Академия ГПС МЧС России, 2009. – 191 с.



Приказ МЧС РФ № 382 от 30.06.2009

- 1) Kirik, E., T. Yurgel'yan, A. Malyshev. On discrete-continuous stochastic floor field pedestrian dynamics model SigMA.DC // In the book “Emergency evacuation of people from buildings”, editors W.Jaskolowski, P.Kepka, 2011. – pp. 155-161.
- 2) Kirik, E., T. Yurgel'yan, D. Krouglov On realizing the shortest time strategy in a CA FF pedestrian dynamics model // Cybernetics and Systems. – 2011. – V.42. – №1. – P.1 – 15.
- 3) Кирик Е.С., Дектерев А.А., Литвинцев К.Ю., Харламов Е.Б., Малышев А.В. Математическое моделирование эвакуации при пожаре // Математическое моделирование, Т. 26 (1), 2014. – С.3-16.
- 4) Кирик Е.С., Малышев А.В. Тестирование компьютерных программ по расчету времени эвакуации на примере модуля SigmaEva // Пожарная безопасность, N.1, 2014. – С. 78-85.
- 5) Kirik E., Malyshev A., Popel E. Fundamental diagram as a model input – direct movement equation of pedestrian dynamics // In the proceedings of the Int. conference «Pedestrian and Evacuation Dynamics`2012» (Eds.: U. Weidmann, U. Kirsch, M. Schreckenberg), Springer, 2014. P. 691-702.
- 6) Kirik E., Malyshev A. On validation of SigmaEva pedestrian evacuation computer simulation module with bottleneck flow // J. of Comp. Science, 5, 2014. – P. 847-850
- 7) Литвинцев К.Ю., Кирик Е.С., Дектерев А.А., Харламов Е.Б., Малышев А.В., Попел Е.В. Расчетно-аналитический комплекс «Сигма ПБ» по моделированию развития пожара и эвакуации // Пожарная безопасность, N 4, 2016. С.51-59.
- 8) Kirik E., Dekterev A., Litvintsev K., Malyshev A., Kharlamov E. The solution of fire safety problems under a design stadia with computer fire and evacuation simulation // IOP Conf. Ser.: Materials Science and Engineering, 456 (2018) 012073 doi:10.1088/1757-899X/456/1/012073
- 9) Kirik E., Malyshev A., Vitova T., Popel E., Kharlamov E. Pedestrian movement simulation for stadiums design // Materials Science and Engineering // IOP Conf. Ser.: Materials Science and Engineering, 456 (2018), 012074
- 10) Kirik, E., Vitova, T. & Malyshev, A. Turns of different angles and discrete-continuous pedestrian dynamics model // Natural Computing (2019).
- 11) Kirik E., Vitova T., Malyshev A., Popel E., A conjunction of the discrete-continuous pedestrian dynamics model SigmaEva with fundamental diagrams // Lecture Notes in Computer Science, Proceedings of the 13<sup>th</sup> International conference “Parallel processing and applied mathematics”, 2020
- 12) Кирик Е.С., Витова Т.Б. Анализ данных натурных экспериментов пешеходного движения в прямом коридоре и их применение для тестирования программ на примере ПО «Сигма ПБ» // Пожарная безопасность, N1, 2020.



# ЭВАКУАЦИЯ: тестирование (прямой коридор)

YouTube (<https://youtu.be/5fbd4kexrzx>) «Тест на точность моделей эвакуации. Часть 1. Движение людских потоков.»)

Область наблюдения: коридор 20 м x 2 м

Тест № 1-1/1 («Тест 1»).

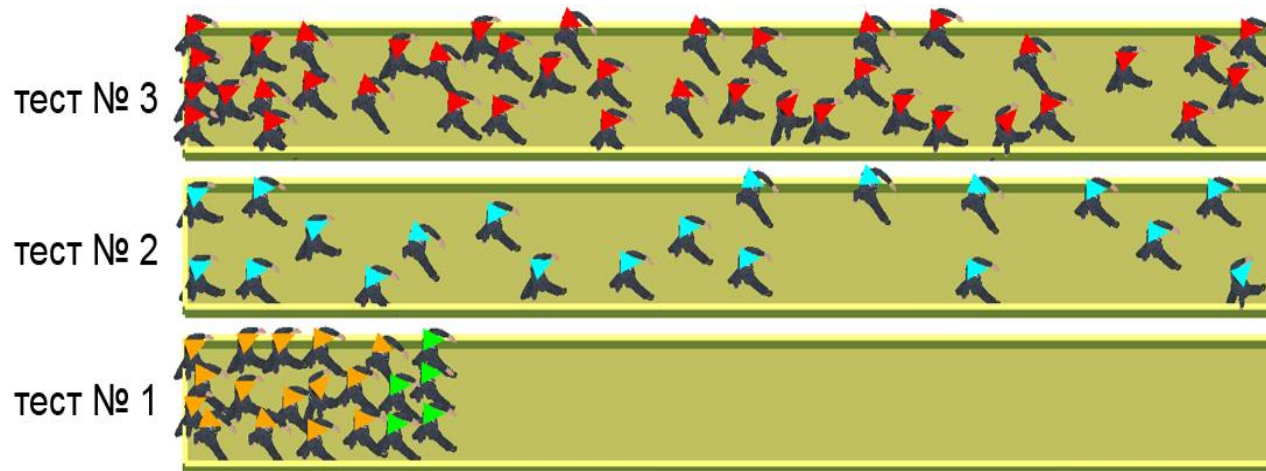
На первый 5 метрах расположено 20 человек.

Тест № 2-1/3 («Тест 2»).

На всей области расположено 19 человек.

Тест № 3-1/5 («Тест 3»).

На всей области расположено 40 человек.



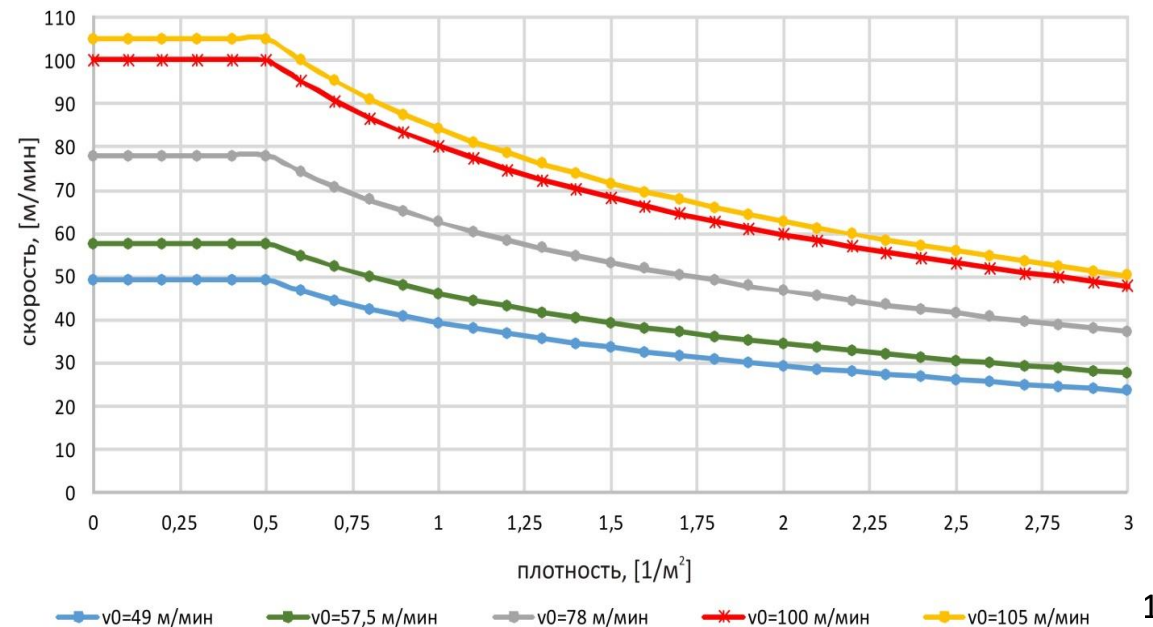
## ИСХОДНЫЕ ДАННЫЕ:

- чем ближе условия вычислительного эксперимента к натурному, тем в большей степени полученные невязки можно расценивать как меру качества моделирования;
- в противном случае сравнению подвергаются несравнимые величины, и анализ отклонений не имеет смысла.

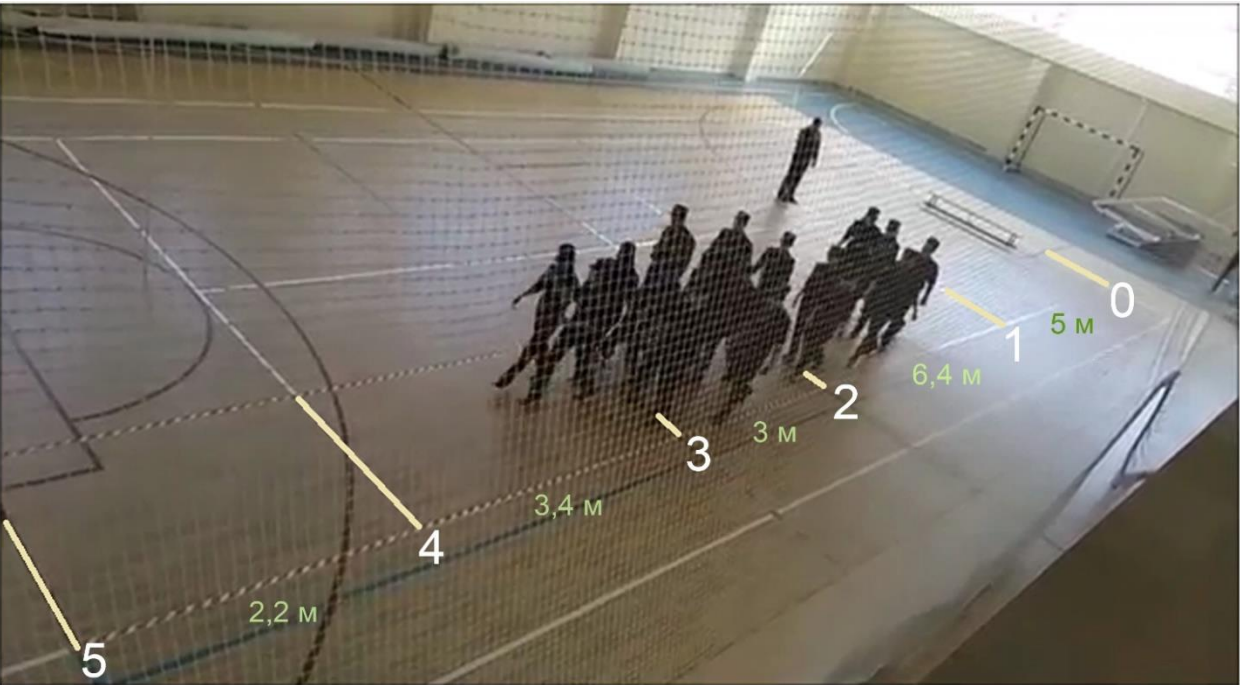
## ИСХОДНЫЕ ДАННЫЕ:

- расчетная область;
- количество и начальное расположение людей;
- площадь проекции;
- скорость свободного движения (!)

$$f^{KhS}(\rho) = \begin{cases} v^0, & 0 \leq \rho \leq 0.51 \\ v^0 \left(1 - 0.295 \ln \frac{\rho}{0.51}\right), & \rho > 0.51 \end{cases}$$



# ЭВАКУАЦИЯ: тестирование (прямой коридор, Тест 1)

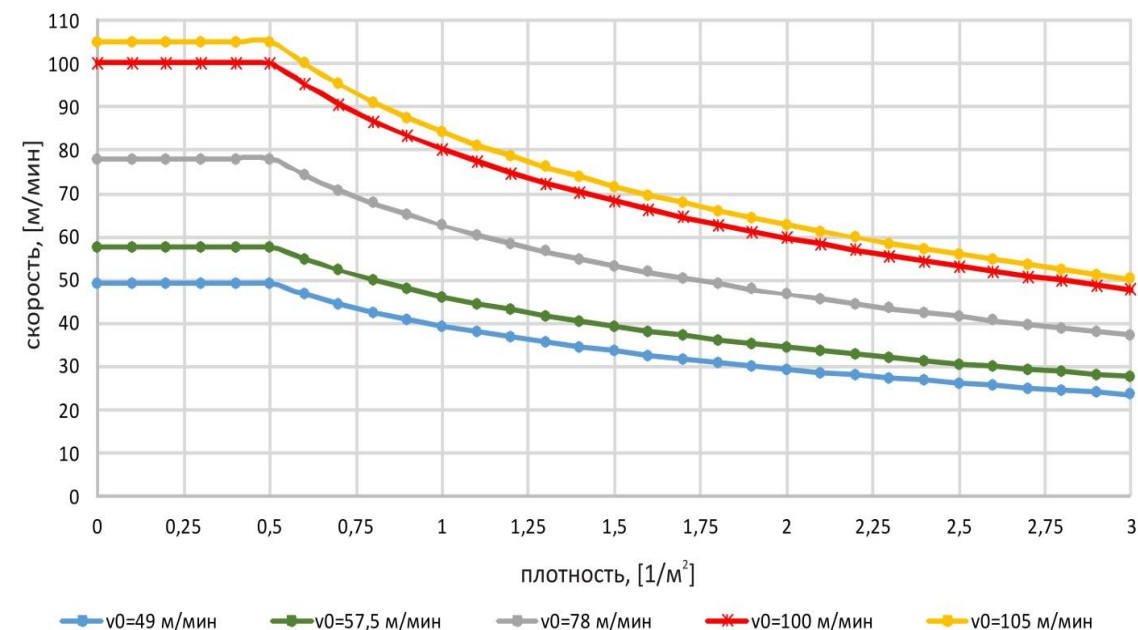
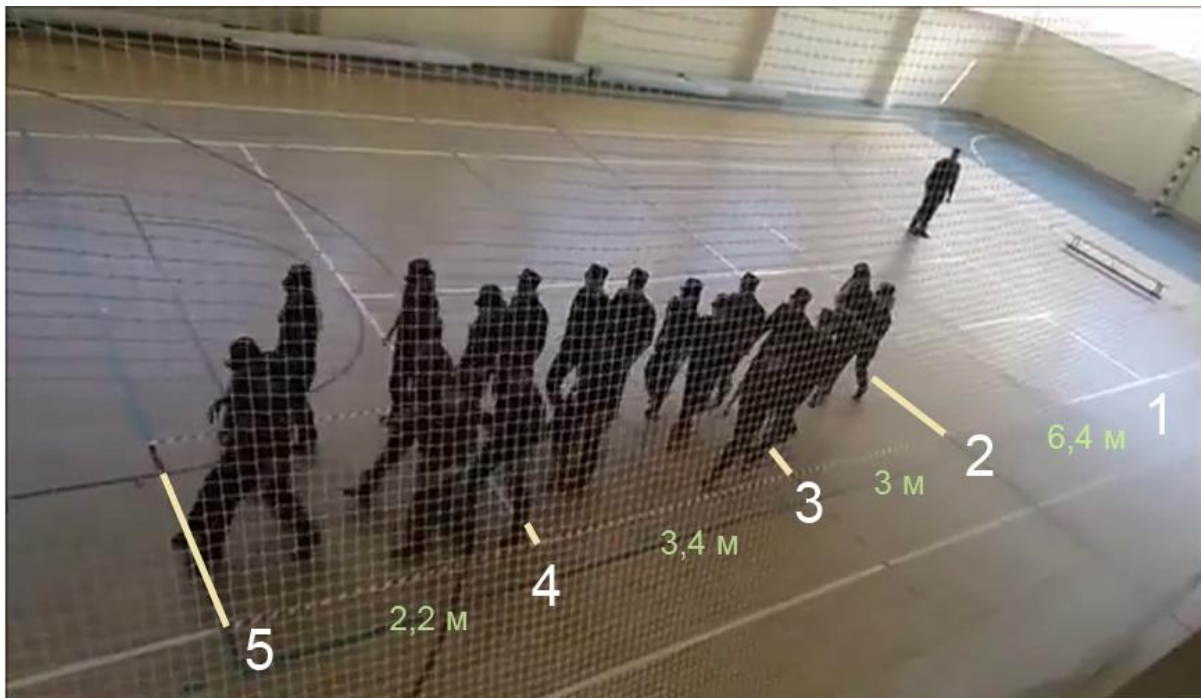


По разметкам, баскетбольной, теннисной, волейбольной, гандбольной площадок определены длины участков



Н.П	Уч-к	характеристики	Фронт	Хвост
1.	0-2	длина, м	6,4	6,4+5=11,4
		время на преодоление, с	5,5	11,78
		скорость, м/с (м/мин)	<b>1,16 (69,6)</b>	<b>0,97 (58,2)</b>
		плотность мгновенная на момент начала движения по участку, чел/м <sup>2</sup>		20/(5*2)=2
		плотность мгновенная на момент окончания движения по участку, чел/м <sup>2</sup>		20/(8*2)=1,25
2.	1-3	длина, м	9,4	9,4
		время на преодоление, с	8,08	8,58
		скорость, м/с	<b>1,16 (69,6)</b>	<b>1,1 (66)</b>
		плотность мгновенная на момент начала движения по участку, чел/м <sup>2</sup>		20/(7*2)=1,4
		плотность мгновенная на момент окончания движения по участку, чел/м <sup>2</sup>		12/(5,5*2)=1,09
3.	2-4	длина, м	6,4	6,4
		время на преодоление, с	5,31	5,81
		скорость, м/с	<b>1,21 (72,6)</b>	<b>1,1 (66)</b>
		плотность мгновенная на момент начала движения по участку, чел/м <sup>2</sup>		20/(8*2)=1,25
		плотность мгновенная на момент окончания движения по участку, чел/м <sup>2</sup>		3/(2,2*2)=0,68
4.	2-5	длина, м	8,6	8,6
		время на преодоление, с	7,21	8,14
		скорость, м/с	<b>1,19 (71,4)</b>	<b>1,06 (63,6)</b>
		плотность мгновенная на момент начала движения по участку, чел/м <sup>2</sup>		20/(8*2)=1,25
		плотность мгновенная на момент окончания движения по участку, чел/м <sup>2</sup>		
5.	0-5	длина, м	15	20
		время на преодоление, с	12,71	20,1
		скорость, м/с	<b>1,18 (70,8)</b>	<b>0,99 (59,4)</b>

# ЭВАКУАЦИЯ: тестирование (прямой коридор, Тест 1)



- начальная плотность (2 чел/м²) в результате растекания потока снижается;
- скорость движения **фронтальной части** = скорость свободного движения =  $15/12,71=1,18$  м/с (70,8 м/мин);
- плотность в интервале [1,09-1,4] чел/м² (среднее значение 1,25 чел/м²);
- оценка скорости хвоста потока в интервале [0,97-1,1] м/с ([58,2-66] м/мин) (среднее значение 1,035 м/с (62,1 м/мин))

Оценка скорости свободного движения хвостовой части:

$$V_0^{хвост} = 1,3 \text{ м/с (78 м/мин).}$$



# ЭВАКУАЦИЯ: тестирование (прямой коридор, результаты)

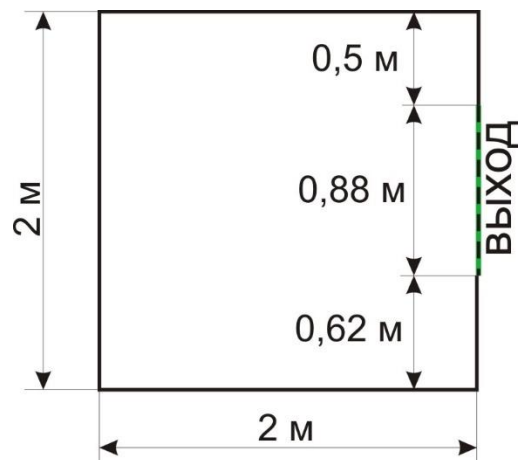
	Тест № 1		Тест № 2	Тест № 3	
Скорость свободного движения, принятая в вычислительном эксперименте, м/с	фронт 1,16; хвост 1,3	1,3	1,66	1,3	1,66
Среднее арифметическое времени , с	20,83	20,33	13,32	19,76	18,79
Среднее квадратическое отклонение, с	0,53	0,54	0,44	0,4	0,21
Время эвакуации в натурном эксперименте , с	20,1	20,1	13	18,6	18,6
Скорость свободного движения, оцененная по видеозаписи, м/с	фронт 1,18, хвост 1,3	фронт 1,18, хвост 1,3	1,66	1,3	1,3
Отклонение от экспериментальных данных , % $\delta = 100 \times \frac{T_{\text{эксп}} - T_{\text{мод}}}{T_{\text{эксп}}}$	-3,61	-1,12	-2,46	-6,25	-1,01



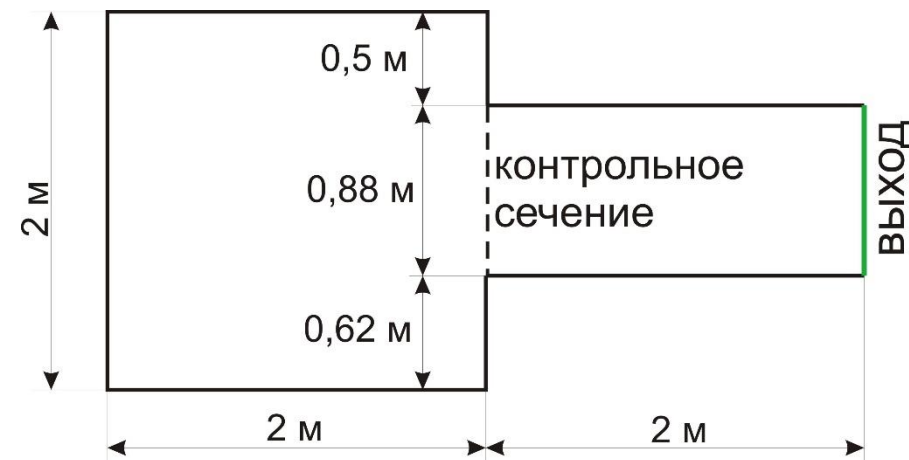
# ЭВАКУАЦИЯ: тестирование (проемы)

8 тестов: 4, 8, 12, 16, 20, 26, 31, 35 человек в области наблюдения

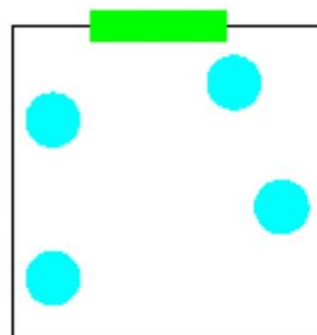
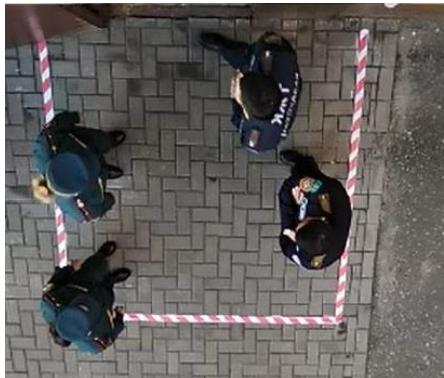
Область наблюдения



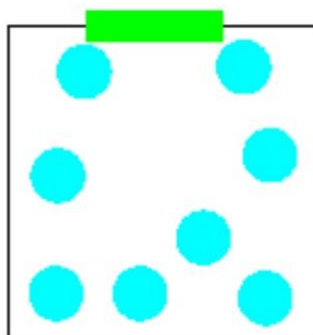
Область моделирования (расчетная область)



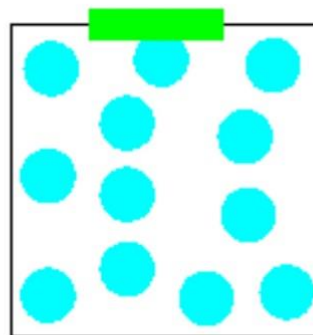
## Начальное расположение людей



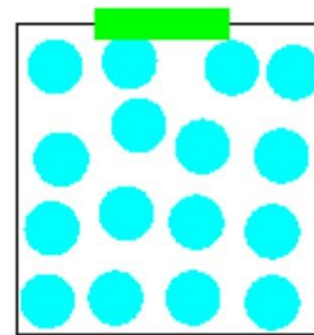
test 9



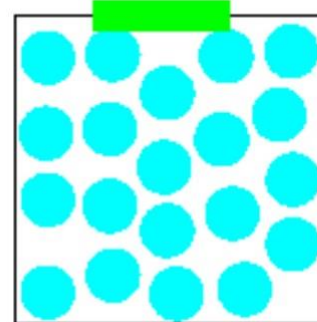
test 10



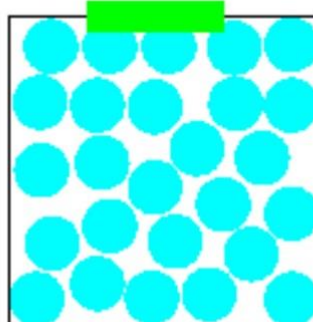
test 11



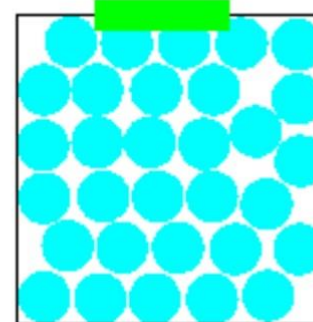
test 12



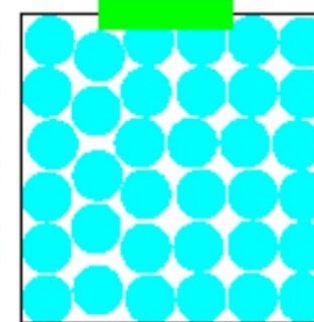
test 13



test 14



test 15








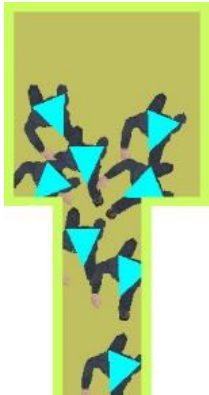


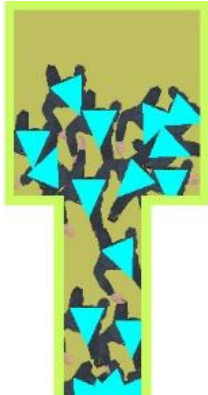
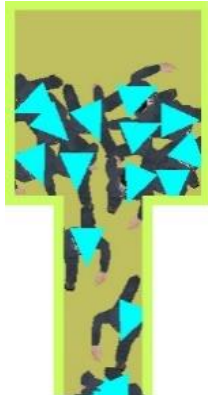
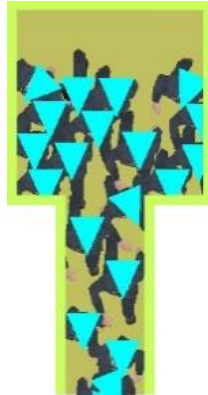
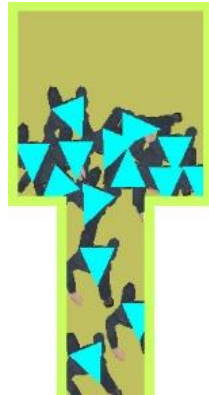


test 16

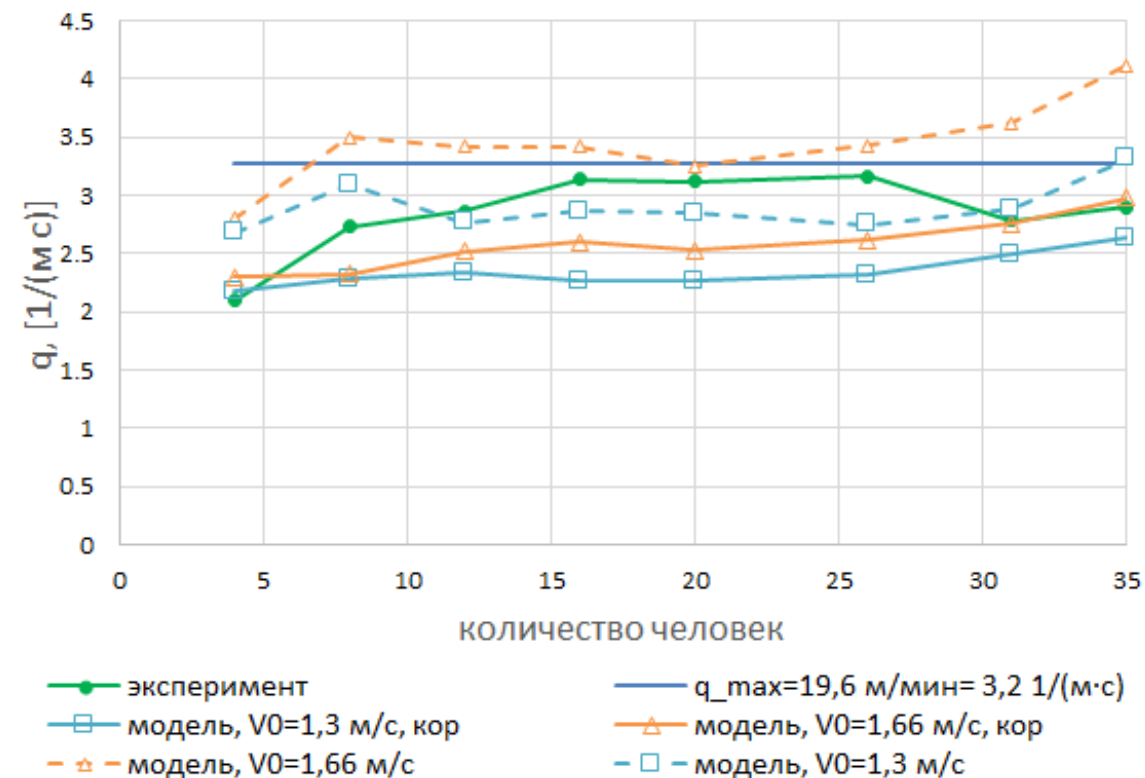
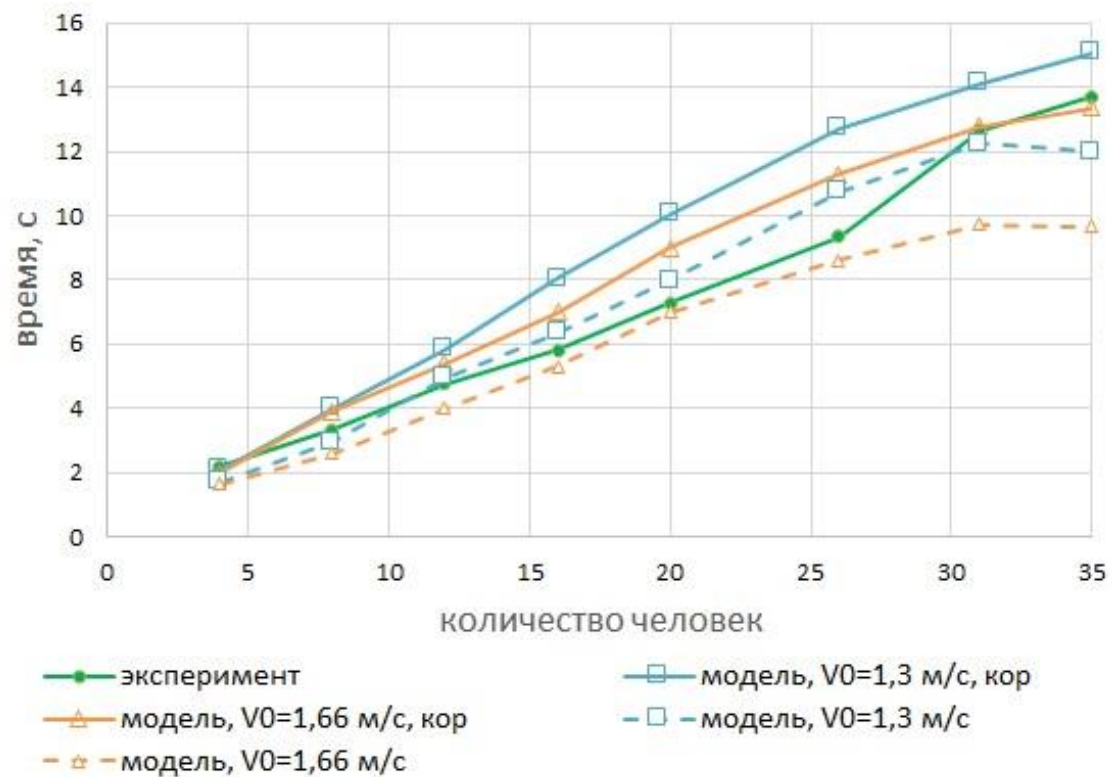




# ЭВАКУАЦИЯ:

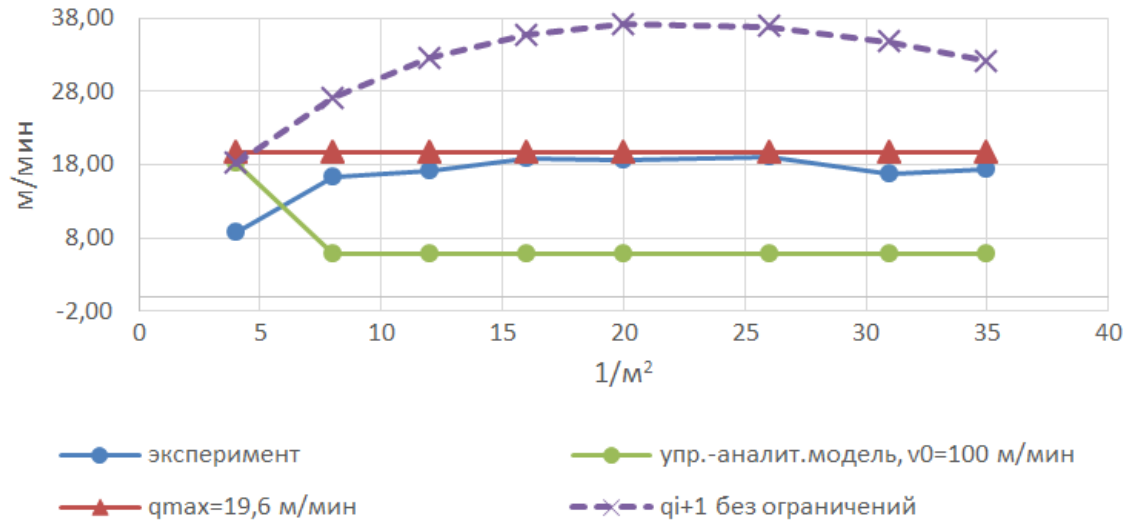
$N(0)$	8	12	16	20	26	31	35
$N(t)$	5-6	8	12-13	10	11	13-14	10-11
							
$t, c$	1,101	1,068	0,935	2,969	3,5	6,006	7,607
							
$t, c$	1,25	1,25	1,25	4,25	6,75	6	10

# ЭВАКУАЦИЯ: тестирование (проемы, сравнение)



# ЭВАКУАЦИЯ: тестирование (проемы, упрощенно-аналитическая модель)

Интенсивность

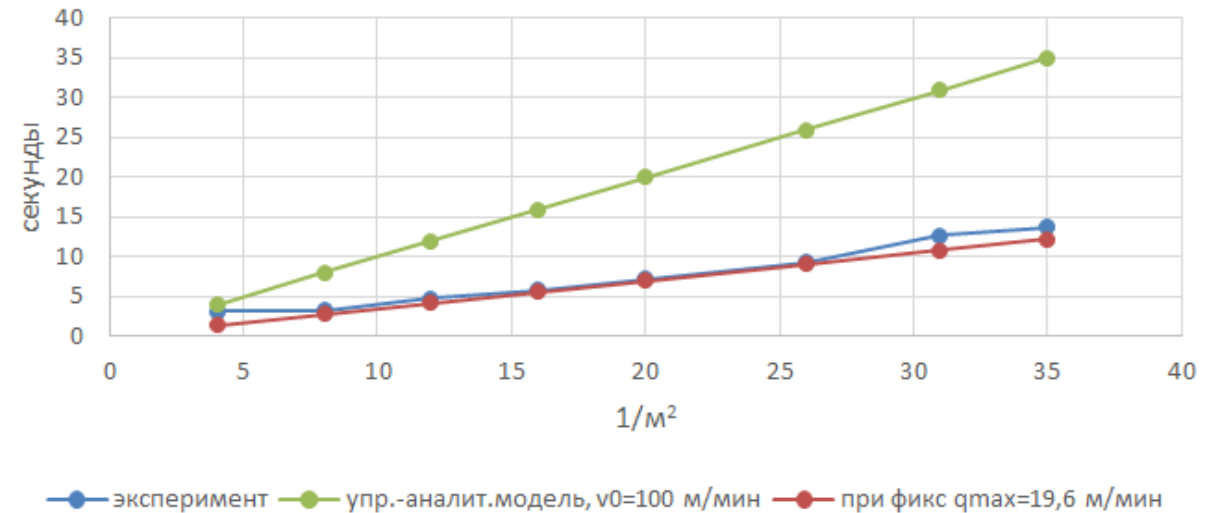


$$q_{\text{эксп}} = N/t/b, [1/(m \cdot c)]$$

$$q_{\text{эксп}} = 60 \cdot 0,1 \cdot N/t/b, [m/\text{мин}]$$

ЭКСПЕРИМЕНТ

Время



МОДЕЛЬ

$$q_{2\_упр-аналит} = q_1 \cdot b_1/b_2 = 0,1 \cdot v \cdot D \cdot b_1/b_2, [m/\text{мин}]$$

$$D = N/(2 \cdot 2), [1/m^2]$$

$$v = f(D), [m/\text{мин}]$$

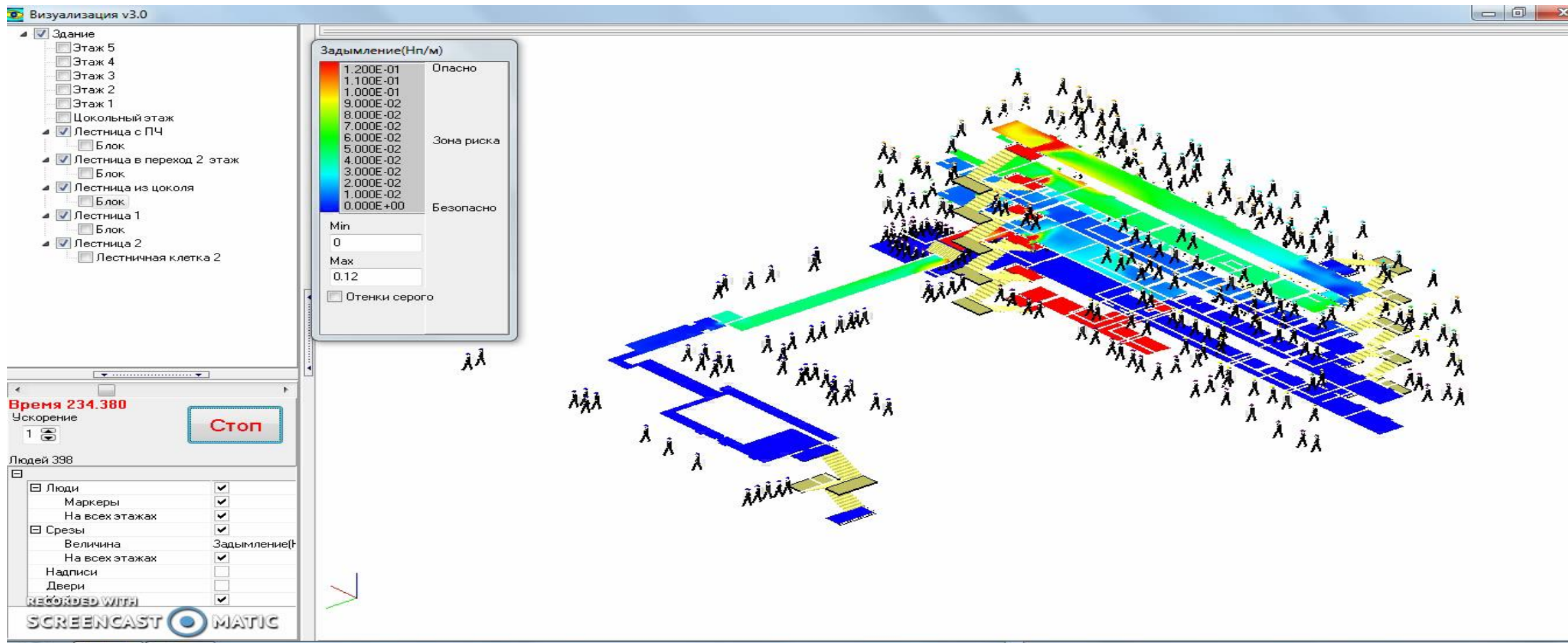
$$t = 60 \cdot N \cdot 0,1/q_2 \cdot 0,88, [c]$$

Порог:  $q = 19,6$  м/мин – **ЭКСПЕРИМЕНТ (ЖИЗНЬ)**

Вывод:

- упрощенно-аналитическая модель не может быть использована в качестве эталонной модели,
- только физический эксперимент может быть источником информации для валидации ПО





Спасибо за внимание!

