

Министерство Российской Федерации
по делам гражданской обороны, чрезвычайным ситуациям
и ликвидации последствий стихийных бедствий

**ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ
«ВСЕРОССИЙСКИЙ ОРДЕНА «ЗНАК ПОЧЕТА» НАУЧНО-
ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ИНСТИТУТ
ПРОТИВОПОЖАРНОЙ ОБОРОНЫ»
(ФГБУ ВНИИПО МЧС РОССИИ)**

УТВЕРЖДАЮ
Начальник института
ФГБУ ВНИИПО МЧС России

Д.М. Гордиенко



2018 г.

РАСЧЕТ

определения времени блокирования путей эвакуации опасными факторами пожара и времени эвакуации людей в качестве исследования обстоятельств возникновения и развития пожара, произошедшего 25.03.2018 в торгово-развлекательном комплексе «Зимняя вишня» г. Кемерово

Заместитель начальника
ФГБУ ВНИИПО МЧС России

А.Ю. Лагозин

МОСКА 2018

Список исполнителей

Ведущий научный сотрудник, к.т.н.



А.Н. Полетаев

Старший научный сотрудник



М.В. Фомин

ОЦЕНКА РАСПРОСТРАНЕНИЯ ОПАСНЫХ ФАКТОРОВ ПОЖАРА В ПОМЕЩЕНИЯХ ЧЕТВЕРТОГО ЭТАЖА ТОРГОВОГО ЦЕНТРА «ЗИМНЯЯ ВИШНЯ», РАСЧЕТЫ ПО ОПРЕДЕЛЕНИЮ ВРЕМЕНИ ЭВАКУАЦИИ ЛЮДЕЙ

25.03.2018 г. в ТЦ «Зимняя вишня» в г. Кемерово произошел пожар, повлекший за собой гибель 64 человек. В этой связи с целью реконструкции картины развития пожара и установления причин и обстоятельств, способствовавших массовой гибели людей на основе имеющихся данных было проведено предварительное моделирование возможного сценария развития пожара и распространения его опасных факторов в объеме 4-го торгового центра. Кроме того, было проведено моделирование нескольких вариантов эвакуации людей, соответствующих данному сценарию развития пожара.

Краткая характеристика объекта

Торгово-развлекательный центр представляет собой здание переменной этажности, с максимальным количеством этажей – пять, без подземных этажей, прямоугольной формы, размером в плане 73×25 м. Высота здания до верхней отметки - 23,75 м. Здание – многофункциональное. В его состав входят объекты следующих классов функциональной пожарной опасности:

Ф3.1. – предприятия торговли;

Ф3.2- предприятие общественного питания;

Ф5.2 – складские помещения;

Ф 4.3 – помещения административного назначения;

Ф3.6 – комплекс физкультурно – оздоровительных помещений;

Ф3.6 – бытовые помещения;

Ф2.1 – комплекс помещений с расчетным числом посадочных мест для посетителей в закрытых помещениях (кинотеатры).

Здание II степени огнестойкости, класса конструктивной пожарной опасности С0. Здание каркасного типа, фундамент железобетонный свайный, наружные стены железобетонные, крупнопанельные самонесущие, колонны железобетонные и металлические прямоугольного сечения, балки перекрытий и покрытие железобетонное, связи между колоннами из металли-

ческих профилей, междуэтажные и чердачное перекрытия, покрытие сборные пустотные, предварительно напряженные и армированные железобетонные плиты. Крыша частично плоская рулонная с внутреннем водостоком, частично двускатная по металлическим направляющим. Перегородки из газобетонных блоков, кирпичные и ГКЛ.

Сценарий развития пожара

Расчетная схема рассмотренного сценария развития пожара представлена на рис. 1.

На основании анализа имеющихся в сети интернет записей с камер видеонаблюдения объекта, а также иной информации содержащейся в СМИ предполагалось, что очаг пожара возникает в сухом бассейне детской игровой зоны с наполнителями из поролон и пластика.

Считалось, что воспламенение происходит от малокалорийного источника и указанные наполнители, а также окружающая горючая нагрузка постепенно вовлекаются в процесс горения.

При расчете были использованы следующие свойства горючей нагрузки (соответствуют двухкомпонентной смеси из полиэтилена и полипропилена) [16]. Теплота сгорания – 39000 кДж/кг, дымообразующая способность – 790 Нп/(м²кг), выделение СО – 0,1 кг/кг, выделение СО₂ – 0,76 кг/кг, выделение HCl – 0,0073 кг/кг, потребление кислорода – 3,31 кг/кг, скорость распространения пламени в горизонтальном направлении – 0,7 см/с.

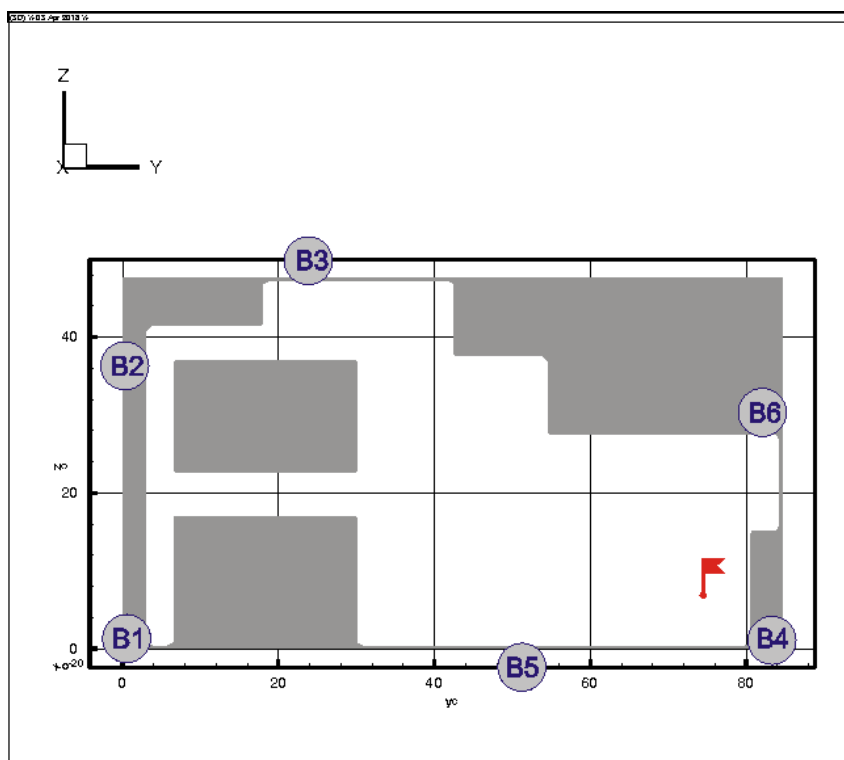


Рис 1. Расчетная схема первого развития пожара
(горизонтальное сечение на высоте 1,7 м от уровня пола).

B1 – B6 - эвакуационные выходы.

Математическая модель расчета распространения ОФП в здании.

Использованная для прогнозирования динамики пожара модель включала в себя следующие основные уравнения:

- уравнения неразрывности и сохранения количества движения

$$\frac{\partial \rho}{\partial \tau} + \frac{\partial \rho u_j}{\partial x_j} = 0, \quad (1)$$

$$\frac{\partial \rho u_i}{\partial \tau} + \frac{\partial \rho u_j u_i}{\partial x_j} = - \frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left((\mu + \mu_t) \frac{\partial u_i}{\partial x_j} \right) + \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\mu_t \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) + \rho g_i, \quad (2)$$

- уравнения к-ε модели турбулентности Лаундера – Сполдинга [2] с поправкой на влияние естественной конвекции [3]

$$\frac{\partial \rho k}{\partial \tau} + \frac{\partial \rho u_j k}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right) + G_K + G_B - \rho \epsilon, \quad (3)$$

$$\frac{\partial \rho \varepsilon}{\partial \tau} + \frac{\partial \rho u_j \varepsilon}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right) + \frac{\varepsilon}{k} [c_1 (G_K + G_B)] - c_2 \rho \frac{\varepsilon^2}{k}, \quad (4)$$

где $\mu_t = c_\mu \rho \frac{k^2}{\varepsilon}$, $G_K = \mu_t \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \frac{\partial u_i}{\partial x_j}$, $G_B = -\beta g \frac{\mu_t}{\sigma_t} \frac{\partial T}{\partial x_j}$, $\beta = -\frac{1}{\rho} \left(\frac{\partial \rho}{\partial T} \right)_p$,

- уравнение сохранения энергии

$$\frac{\partial \rho h}{\partial \tau} + \frac{\partial \rho u_j h}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\left(\frac{\mu}{\sigma_h} + \frac{\mu_t}{\sigma_t} \right) \frac{\partial h}{\partial x_j} \right) + S_{h,rad}, \quad (5)$$

- уравнения сохранения масс компонентов

$$\frac{\partial \rho Y_i}{\partial \tau} + \frac{\partial \rho u_j Y_i}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\left(\frac{\mu}{Sc} + \frac{\mu_t}{Sc_t} \right) \frac{\partial Y_i}{\partial x_j} \right) + S_i. \quad (6)$$

При расчетах были использованы следующие значения констант [5]:

$$C_\mu = 0,09; C_1 = 1,44; C_2 = 1,92; \sigma_k = 1,0; \sigma_\varepsilon = 1,3; \sigma_t = \sigma_h = Sc_h = Sc_t = 0,7$$

Для моделирования процессов горения был применен вариант диффузионно-вихревой модели горения Магнуссена [4]:

$$S_f = -\rho \frac{\varepsilon}{k} \min \left\{ C \cdot Y_f, C \frac{Y_{ox}}{s}, B \frac{Y_{pr}}{s+1} \right\}, \quad (7)$$

где $C=4$, $B=2$.

Для расчета процессов излучения использовалась модель дискретного радиационного теплопереноса [6]. При определении оптических свойств газа применялась модель взвешенной суммы серых газов [7] с коэффициентами Трюлава [8].

В качестве граничных условий для уравнений движения на твердых поверхностях использовались условия прилипания ($\vec{u} = 0$). При решении уравнения энергии на всех внешних поверхностях конструкции задавались изотермические граничные условия. Теплообмен на внутренних поверхностях рассчитывался с помощью пристеночных функций.

В соответствии с методикой [15] критическое время по каждому из

опасных факторов пожара определялось как время достижения этим фактором предельно допустимого значения на путях эвакуации на высоте 1,7 м от пола.

Предельно допустимые значения по каждому из опасных факторов пожара составляют [15]:

по повышенной температуре – 70°C ;

по тепловому потоку – 1400 Вт/м^2 ;

по потере видимости – 20 м (для случая, когда оба горизонтальных линейных размера помещения меньше 20 м, предельно допустимое расстояние по потере видимости следует принимать равным наибольшему горизонтальному линейному размеру);

по пониженному содержанию кислорода – $0,226 \text{ кг/м}^3$;

по каждому из токсичных газообразных продуктов горения (CO_2 – $0,11 \text{ кг/м}^3$; CO – $1,16 \cdot 10^{-3} \text{ кг/м}^3$).

В качестве критического расстояния для оценки времени блокирования по потере видимости в дыму было выбрано значение 20 м, что примерно соответствует максимальным линейным размерам рассматриваемых помещений. Согласно [15], данным значениям критического расстояния при стандартных условиях освещенности соответствуют значения оптической плотности дыма $0,12 \text{ Нп/м}$.

Оптическая плотность дыма рассчитывалась на основании допущения о подобии полей концентрации CO_2 и оптической плотности дыма [14]. При этом, согласно проведенному в данной работе сравнению с экспериментальными данными погрешность определения оптической плотности дыма с помощью данного метода составляет 25%.

Погрешность расчета по полевой модели составляет около 30% при наличии достоверных исходных данных, определяющих вид горючей нагрузки, местоположение и площадь начального очага пожара, степень открытия оконных и дверных проемов. Поскольку в данном случае

достоверная информация о начальной стадии пожара отсутствует, погрешность может превышать указанное значение.

Данная математическая модель была реализована с помощью программы SOFIE [1].

Верификация модели.

Математическая модель, использованная при расчете распространения ОФП по зданию ранее была апробирована в работах [9],[10],[11],[12],[13] путем сравнения результатов численного моделирования с экспериментальными данными.

Результаты расчета распространения ОФП.

Динамику данного варианта развития пожара можно проиллюстрировать следующими основными моментами:

t=40 с. Продукты горения достигают потолка помещения очага пожара и распространяются под ним в радиальном направлении.

t=90 с. На отдельных участках площади помещения очага пожара дым опускается ниже отм. 1,7 м от уровня пола (рис.2).

t=150 с. На отдельных участках рассматриваемой площади дым с концентрацией превышающей критическое значение опускается ниже отм. 1,7 м от уровня пола, блокируется по признаку потери видимости эвакуационный выход В6 (рис.3).

t=190 с. На большей части рассматриваемой площади дым опускается ниже отм. 1,7 м от уровня пола (рис.4).

t=240 с. Блокируются по признаку потери видимости эвакуационные выходы В3 и В5 (рис.5).

t=380 с. Блокируются по признаку потери видимости и превышению концентрации НС1 все рассматриваемые эвакуационные выходы, кроме В1 (рис.6,17).

t=440 с. Блокируется по признаку превышения критической температуры эвакуационный выход В3 (рис. 9).

t=520 с. Блокируются по признаку превышения критической температуры все рассматриваемые эвакуационные выходы, кроме В1 (рис. 10).

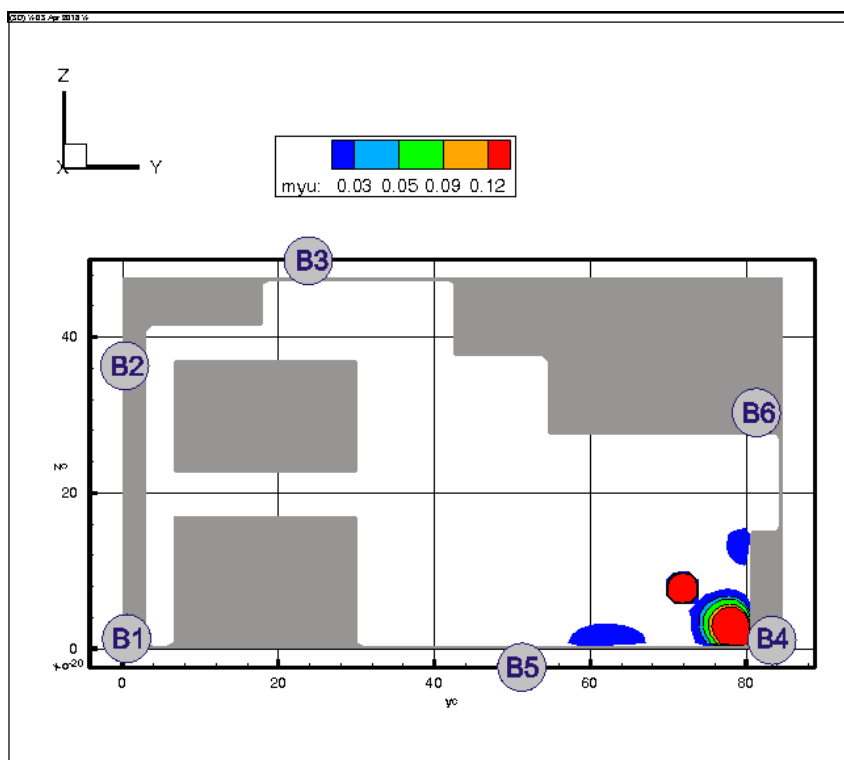


Рис. 2. Оптическая плотность дыма (Нп/м) в горизонтальном сечении на высоте 1,7 м от уровня пола в момент времени 90 с.

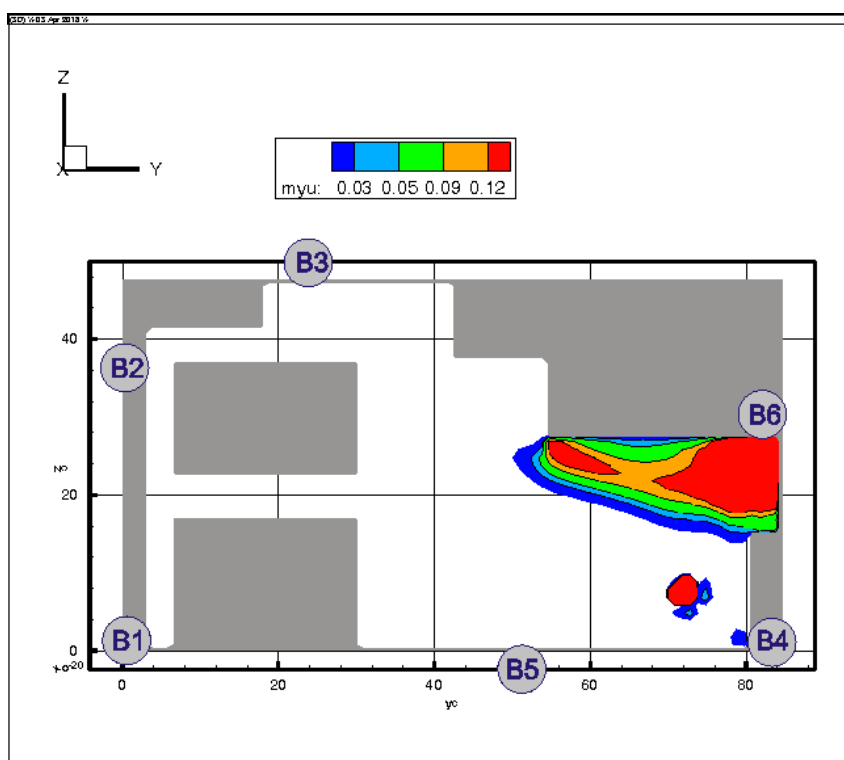


Рис. 3. Оптическая плотность дыма (Нп/м) в горизонтальном сечении на высоте 1,7 м от уровня пола в момент времени 150 с.

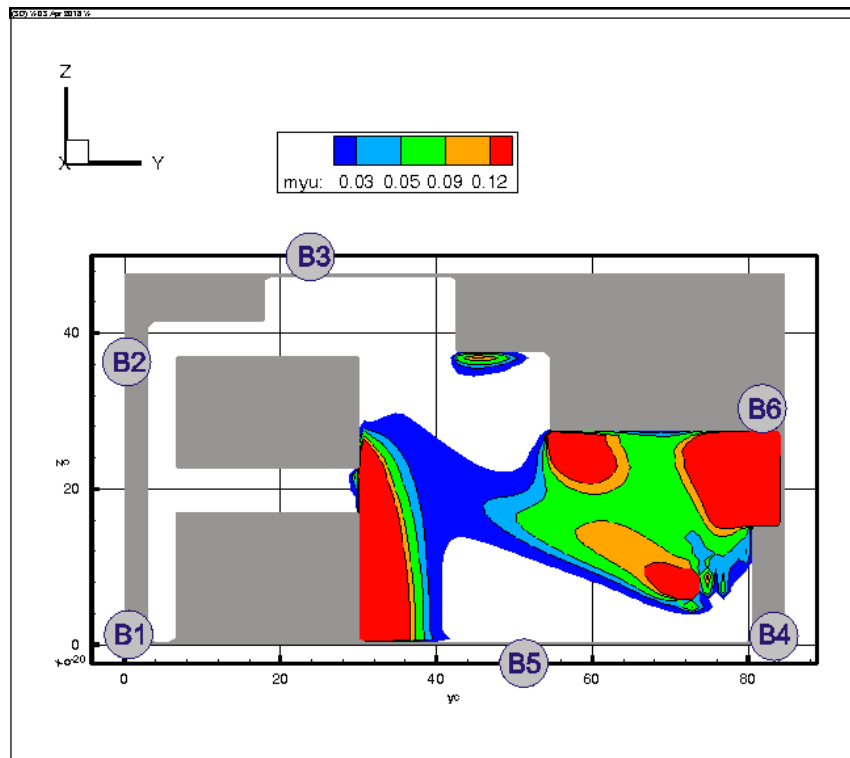


Рис. 4. Оптическая плотность дыма (Нп/м) в горизонтальном сечении на высоте 1,7 м от уровня пола в момент времени 190 с.

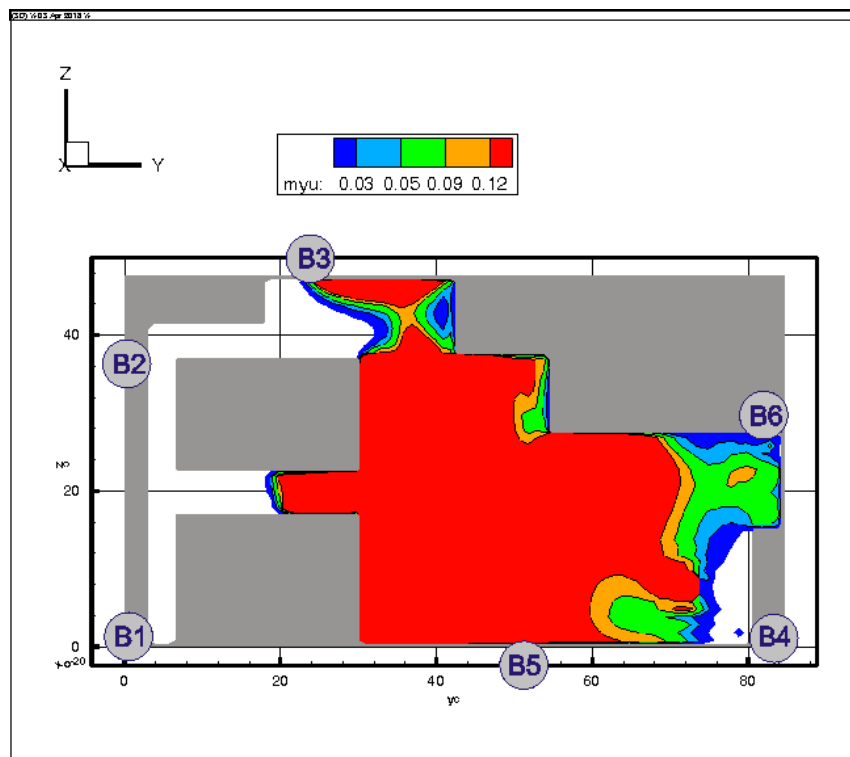


Рис. 5. Оптическая плотность дыма (Нп/м) в горизонтальном сечении на высоте 1,7 м от уровня пола в момент времени 240 с.

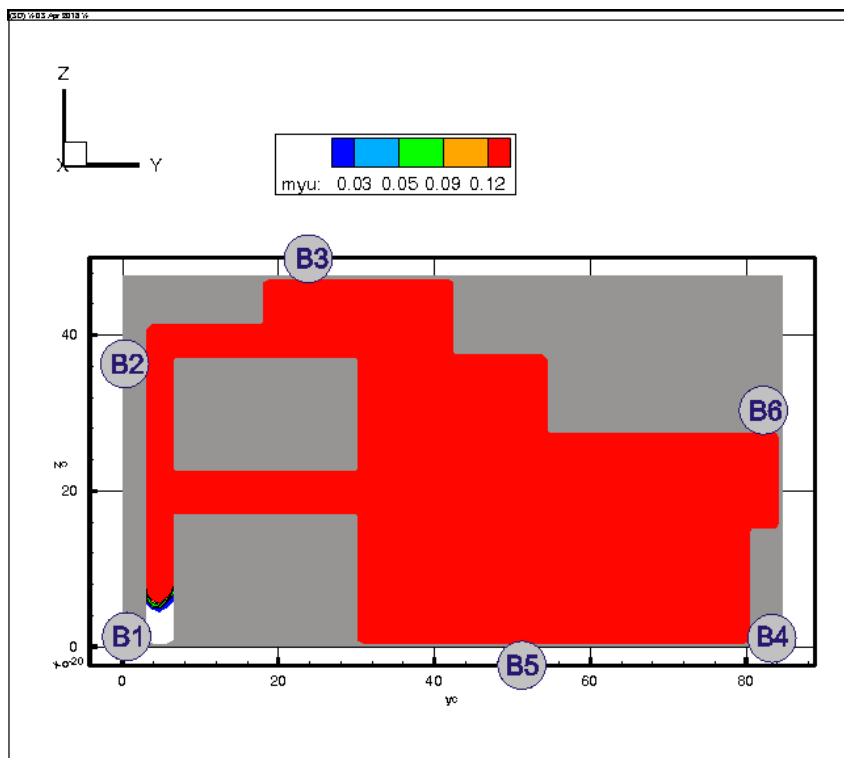


Рис. 6. Оптическая плотность дыма (Нп/м) в горизонтальном сечении на высоте 1,7 м от уровня пола в момент времени 380 с.

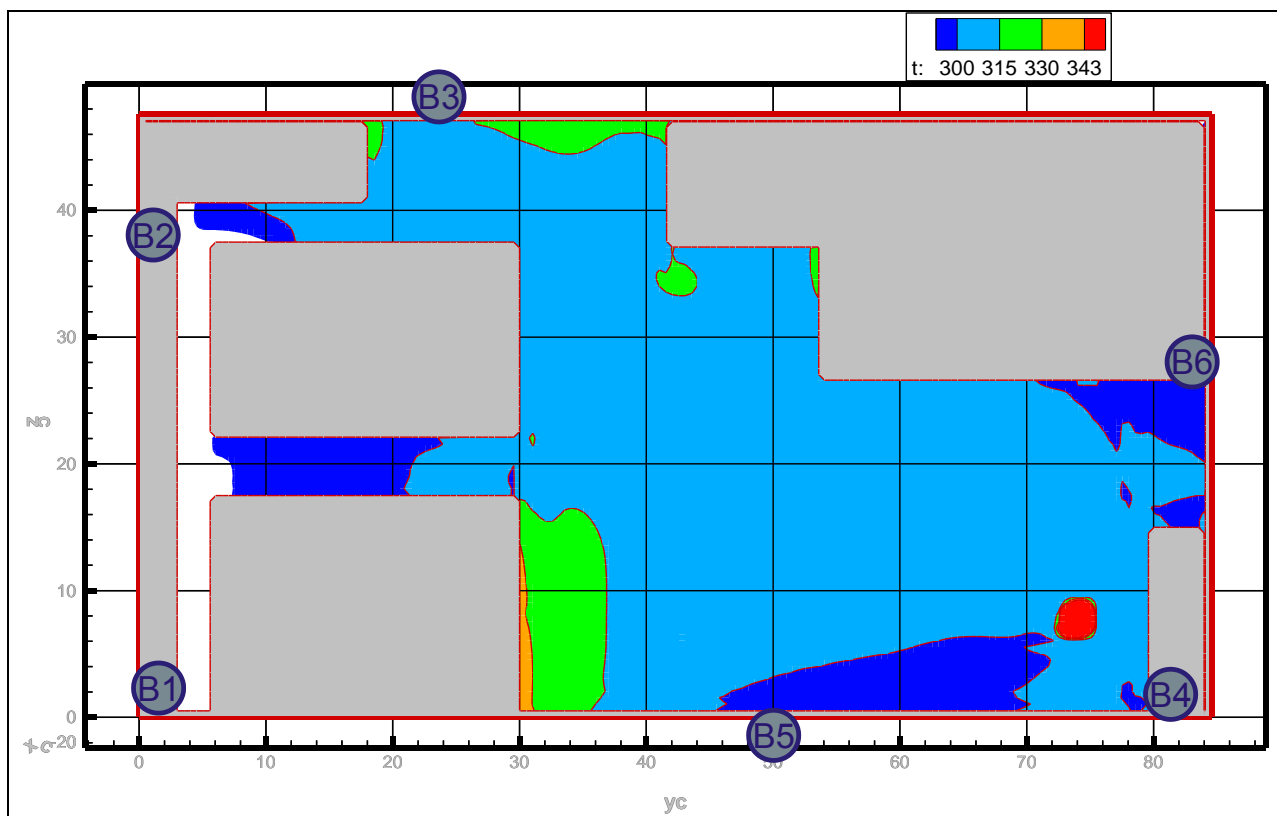


Рис. 7. Температура (К) в горизонтальном сечении на высоте 1,7 м от уровня пола в момент времени $t = 300$ с

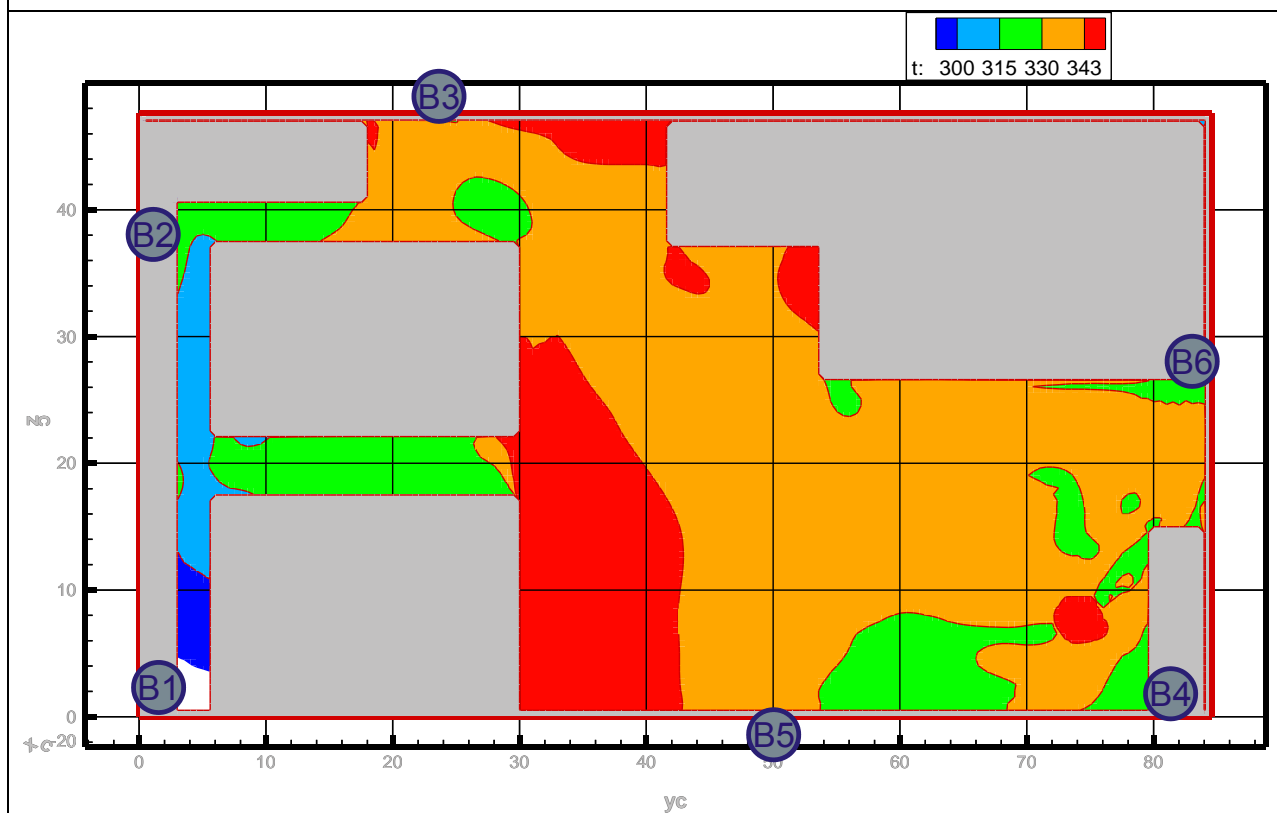


Рис. 8. Температура (К) в горизонтальном сечении на высоте 1,7 м от уровня пола в момент времени $t = 380$ с

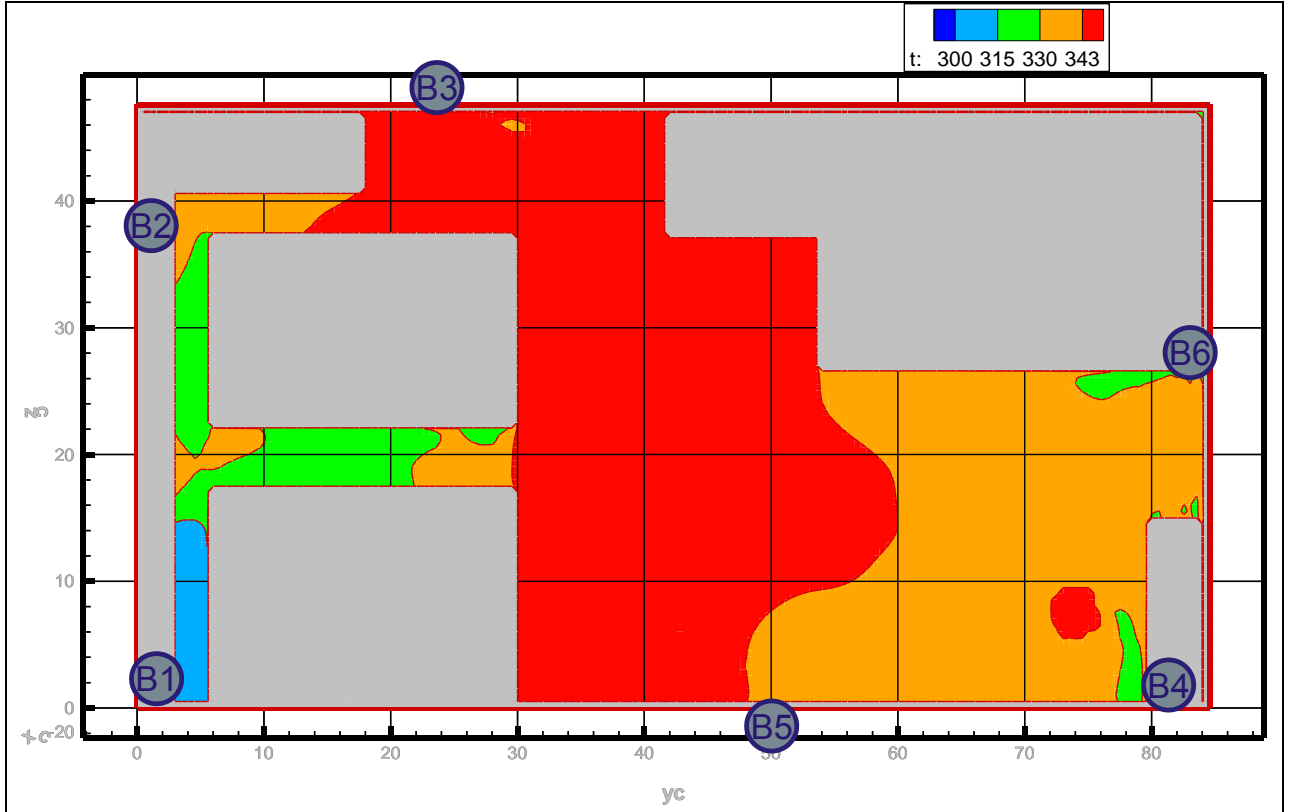


Рис. 9. Температура (К) в горизонтальном сечении на высоте 1,7 м от уровня пола в момент времени $t = 440$ с

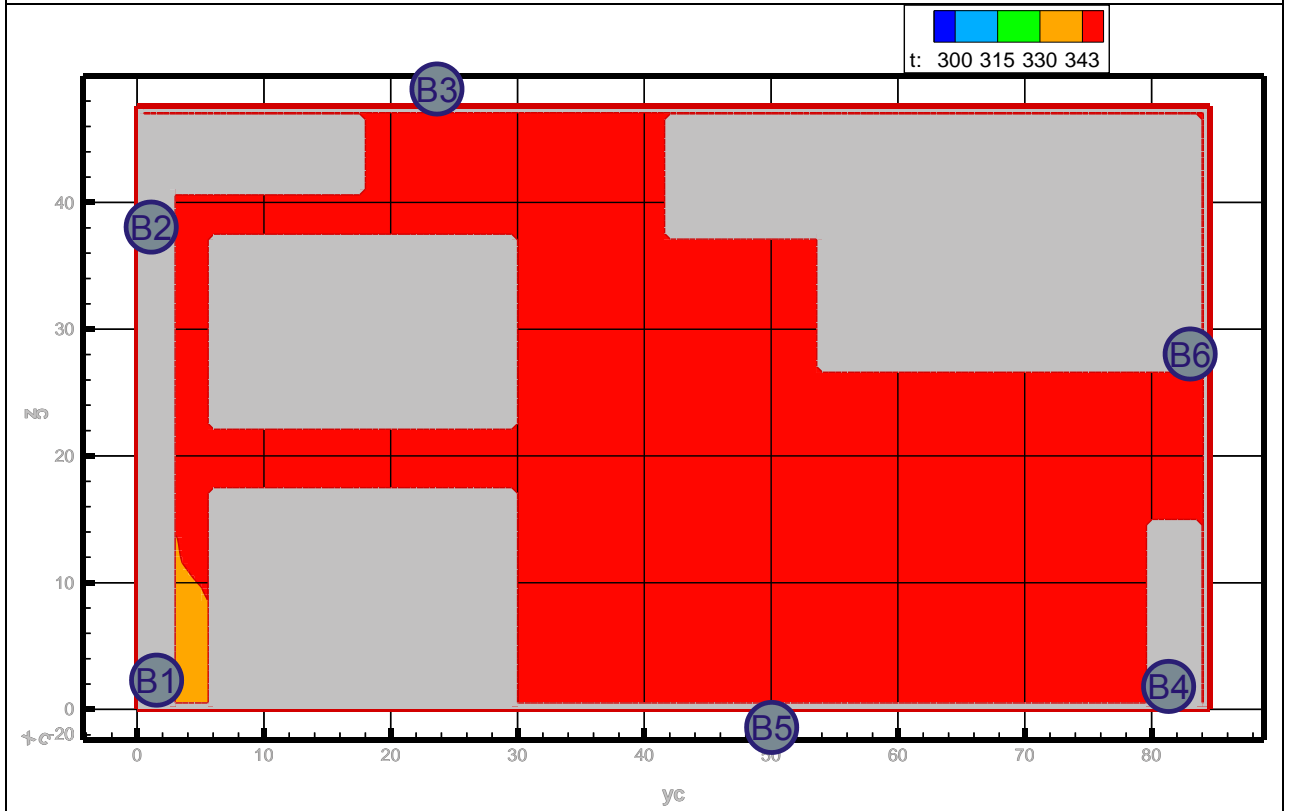


Рис. 10. Температура (К) в горизонтальном сечении на высоте 1,7 м от уровня пола в момент времени $t = 520$ с

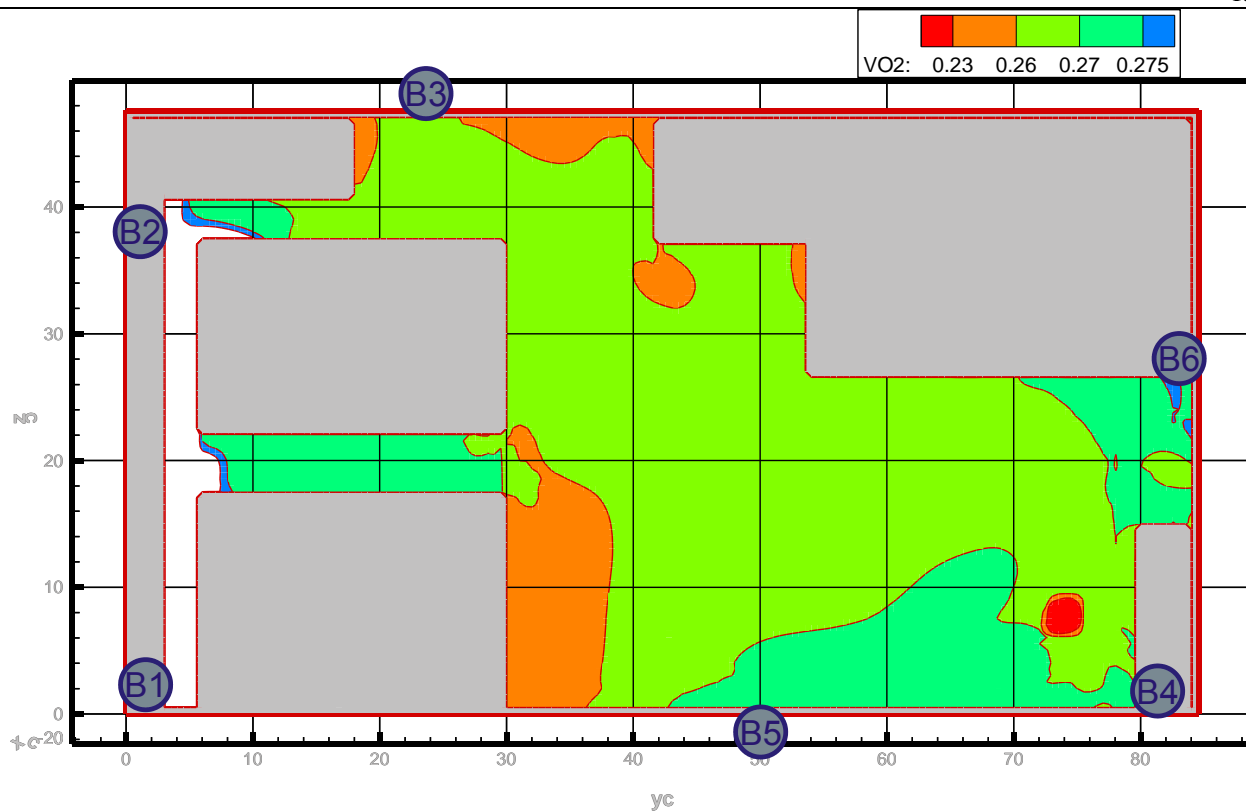


Рис. 11. Концентрация O_2 (кг/м³) в горизонтальном сечении на высоте 1,7 м от уровня пола в момент времени $t = 300$ с.

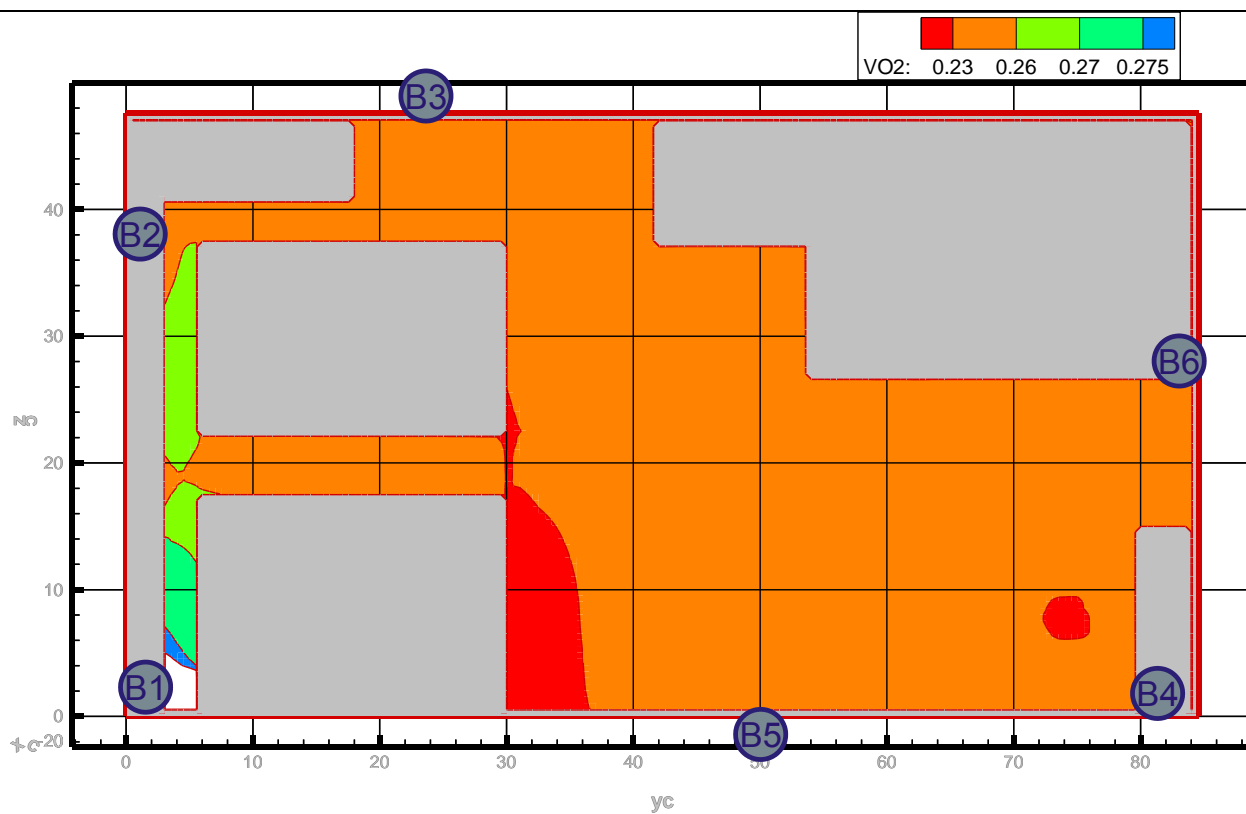


Рис. 12. Концентрация O_2 (кг/м³) в горизонтальном сечении на высоте 1,7 м от уровня пола в момент времени $t = 380$ с.

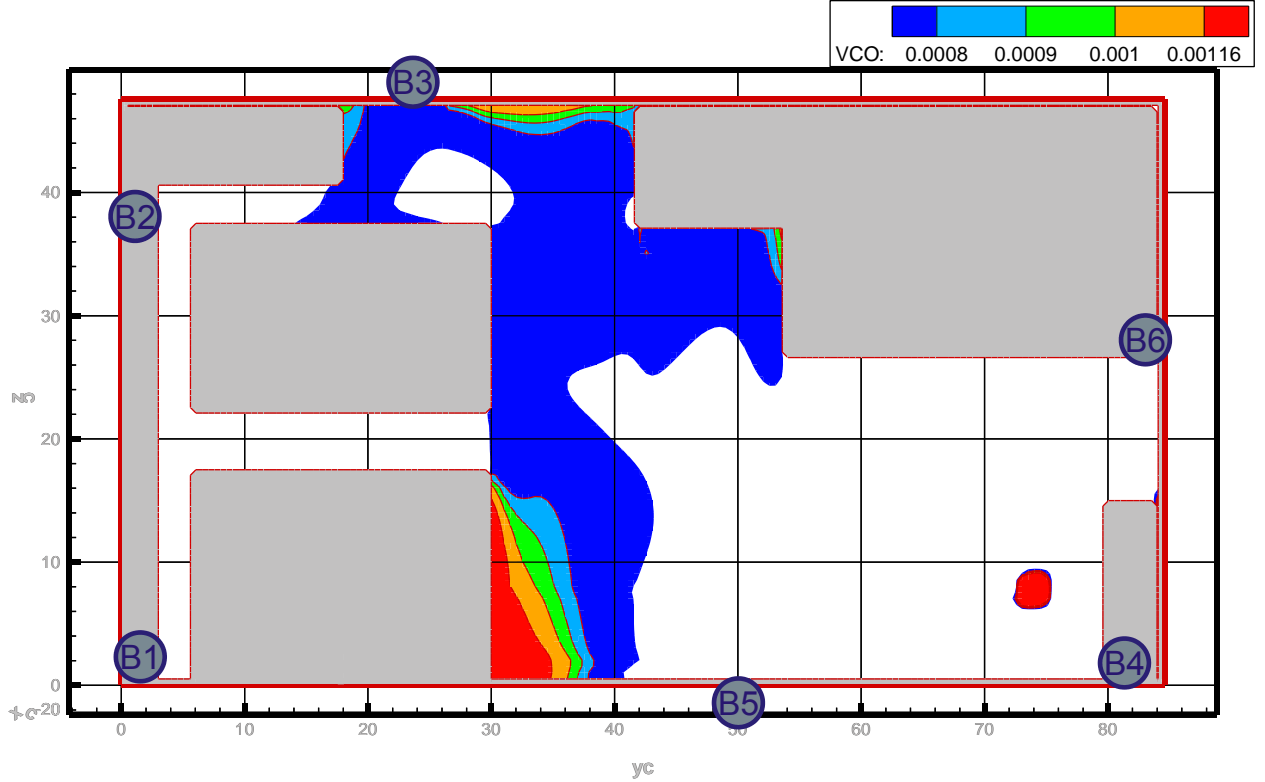


Рис. 13. Концентрация CO (кг/м³) в горизонтальном сечении на высоте 1,7 м от уровня пола в момент времени t = 300 с.

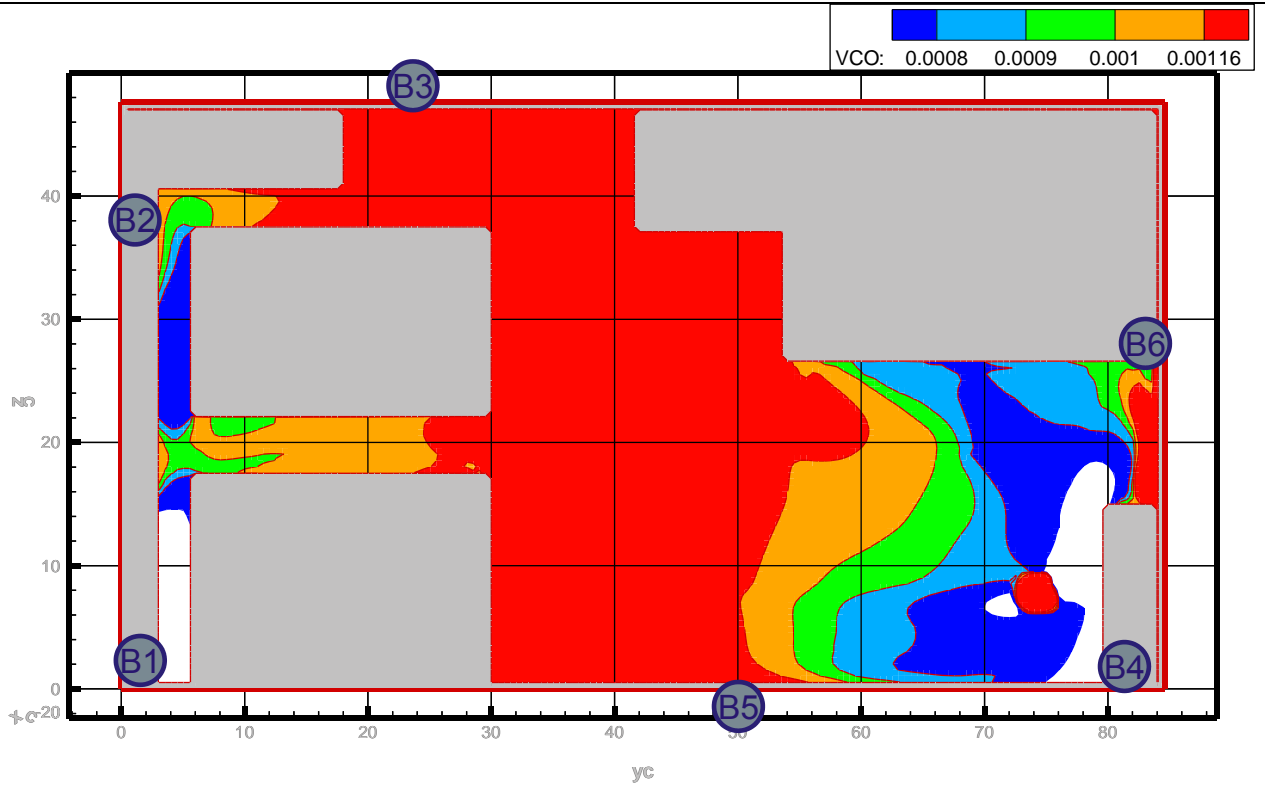


Рис. 14. Концентрация CO (кг/м³) в горизонтальном сечении на высоте 1,7 м от уровня пола в момент времени t = 380 с.

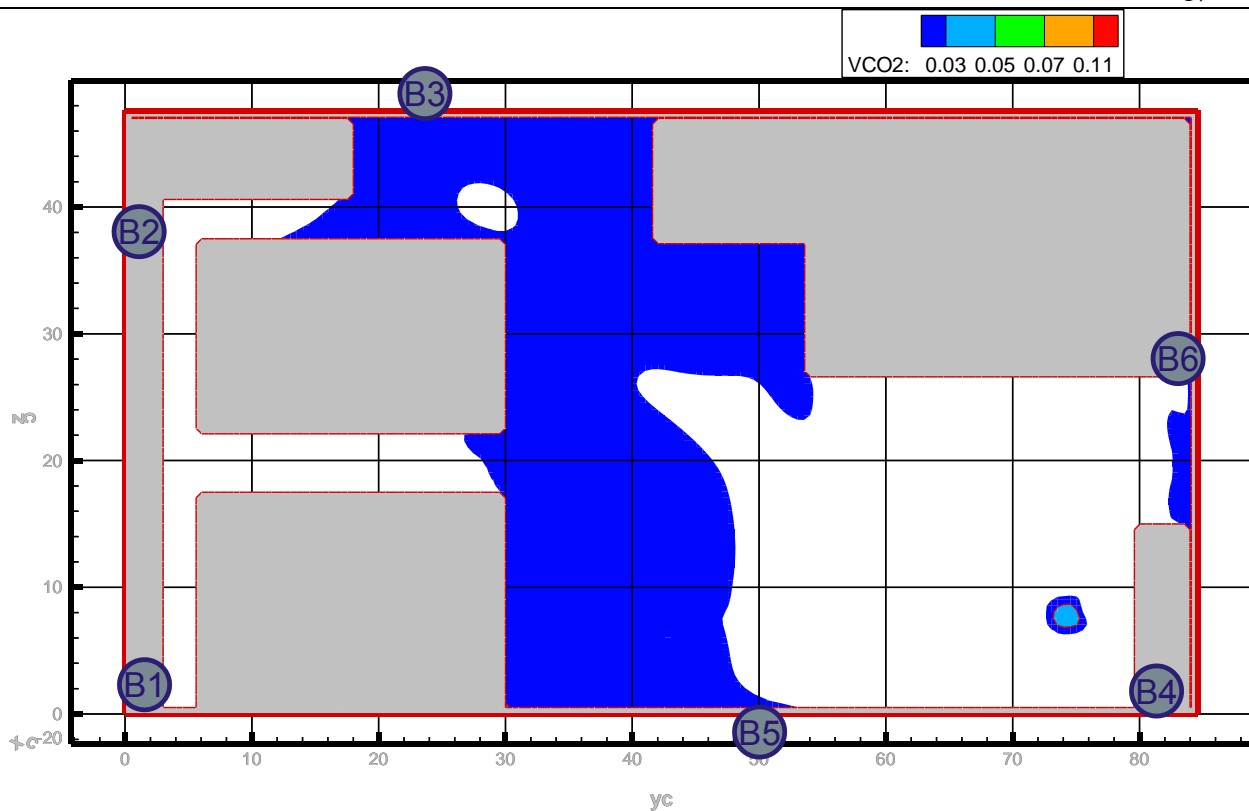


Рис. 15. Концентрация CO_2 ($\text{кг}/\text{м}^3$) в горизонтальном сечении на высоте 1,7 м от уровня пола в момент времени $t = 380$ с.

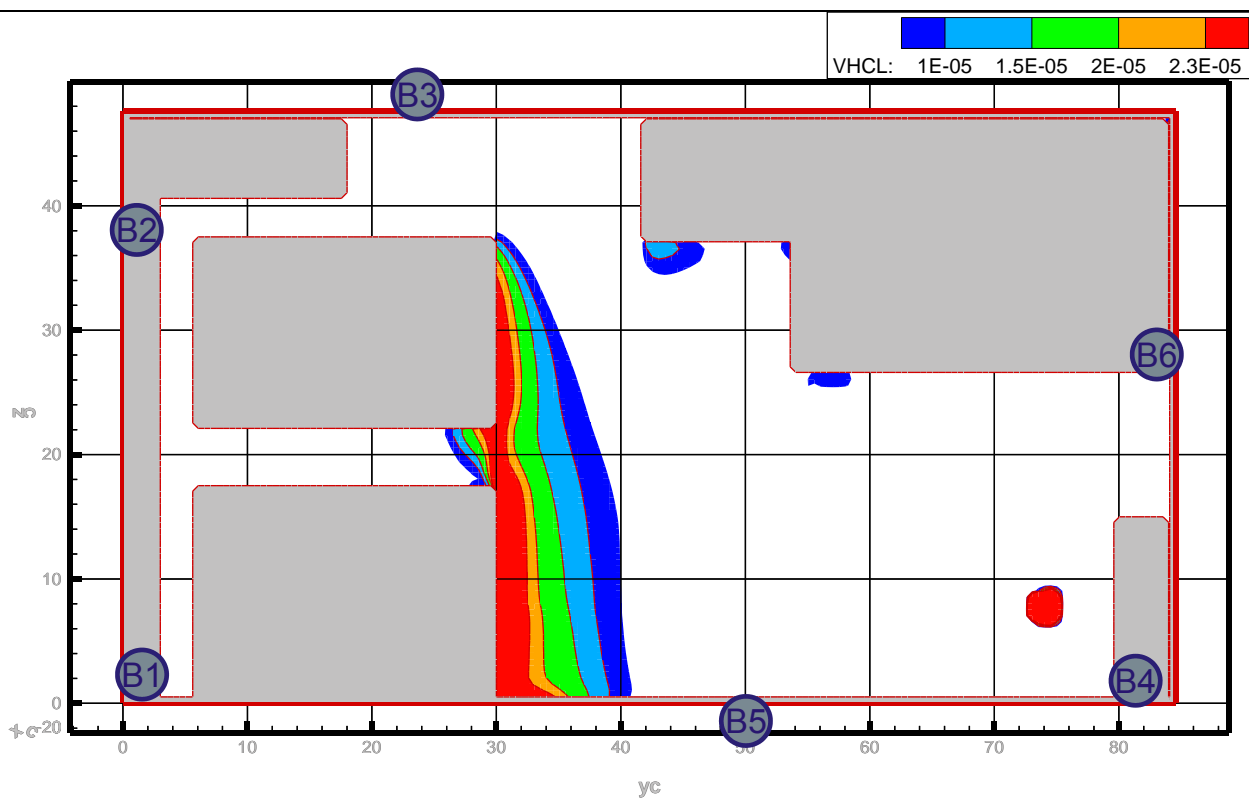


Рис. 16. Концентрация HCl ($\text{кг}/\text{м}^3$) в горизонтальном сечении на высоте 1,7 м от уровня пола в момент времени $t = 200$ с.

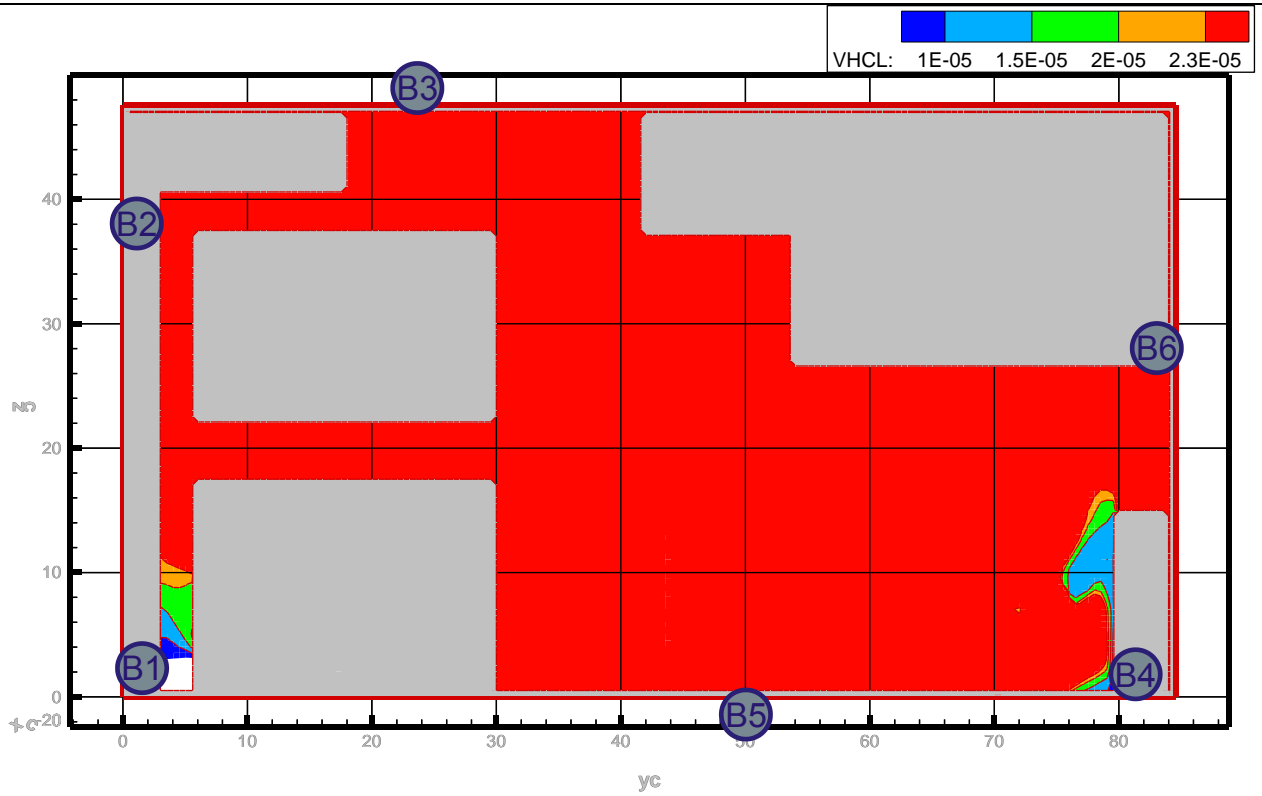


Рис. 17. Концентрация HCl ($\text{кг}/\text{м}^3$) в горизонтальном сечении на высоте 1,7 м от уровня пола в момент времени $t = 380$ с.

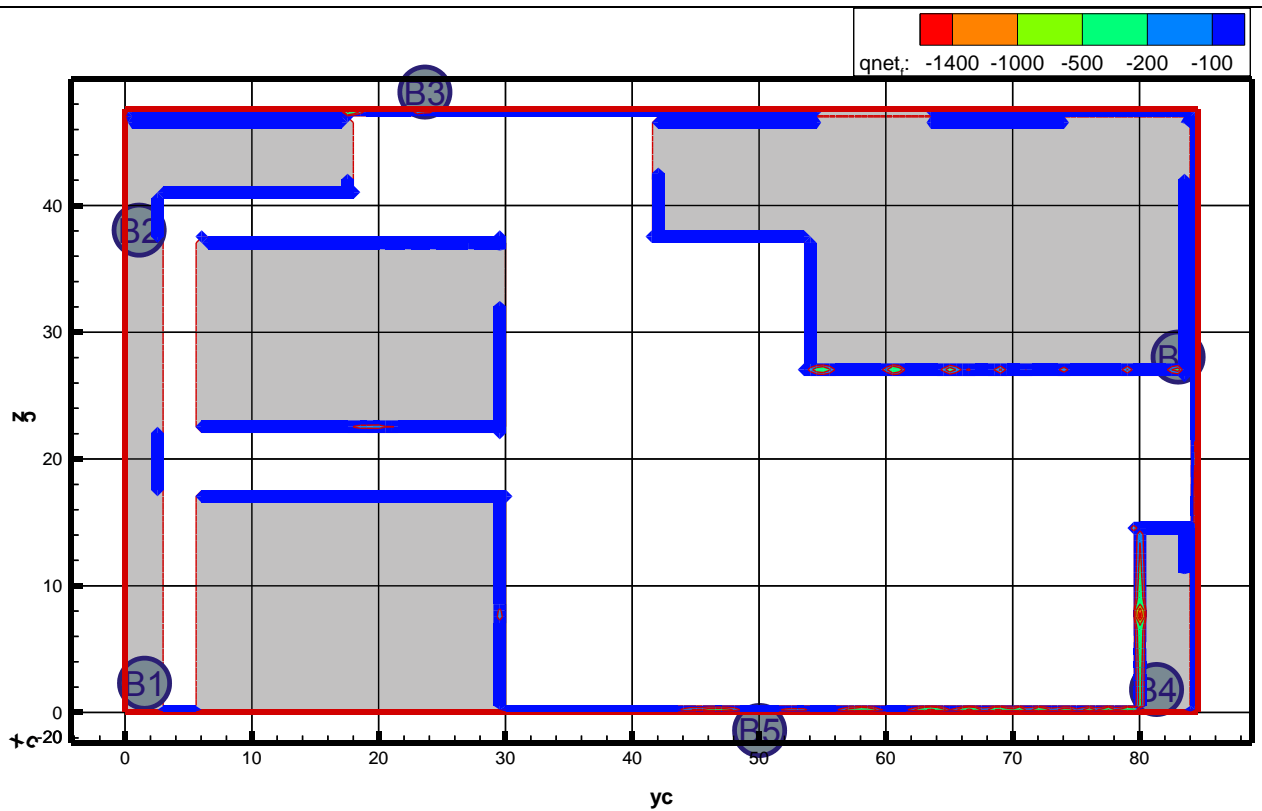


Рис. 18. Тепловой поток ($\text{Вт}/\text{м}^2$) на ограждающих конструкциях помещения в момент времени $t = 200$ с.

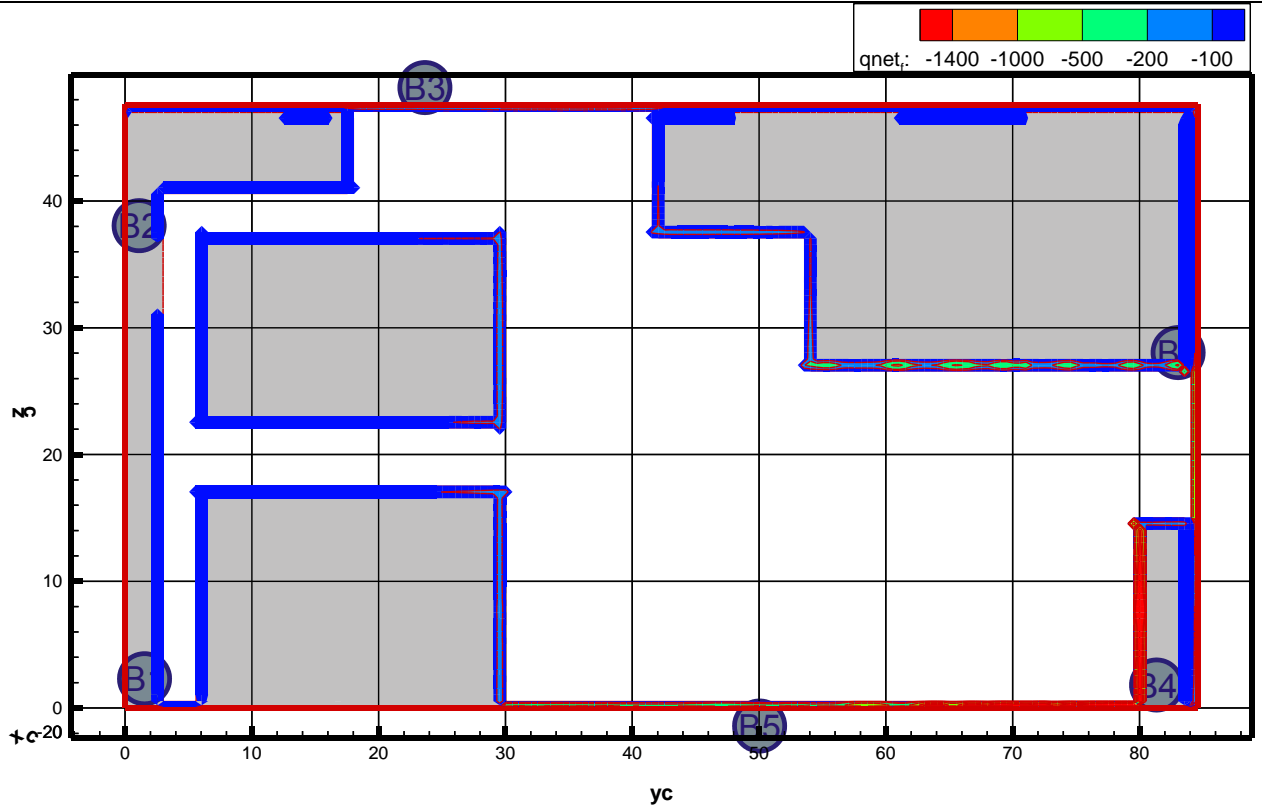


Рис. 19. Тепловой поток (Вт/м²) на ограждающих конструкциях помещения в момент времени $t = 380$ с.

РАСЧЕТЫ ПО ОПРЕДЕЛЕНИЮ ВРЕМЕНИ ЭВАКУАЦИИ ЛЮДЕЙ

Для проведения оценки возможности эвакуации людей из помещений 4-го этажа здания торгово-развлекательного центра «Зимняя вишня», расположенного по адресу: г. Кемерово, проспект Ленина, 35 было проведено моделирование процесса движения людей к эвакуационным выходам.

Для определения времени эвакуации использовалась модель индивидуально-поточного движения людей из здания, приведенная в приложении № 3 к Методике [15].

Расчетное время эвакуации людей определяется по математической модели индивидуально-поточного движения людей из здания, приведенной в приложении № 3 к Методике [15].

Расчетное время эвакуации людей из здания устанавливается по времени выхода из него последнего человека.

Перед началом моделирования процесса эвакуации задается схема эвакуационных путей в здании. Все эвакуационные пути подразделяются на эвакуационные участки длиной a и шириной b . Длина и ширина каждого участка пути эвакуации для проектируемых зданий принимаются по проекту, а для построенных – по фактическому положению. Длина пути в дверном проеме принимается равной нулю.

За габариты человека в плане принимается эллипс с размерами осей 0,5 м (ширина человека в плечах) и 0,25 м (толщина человека). В случае маломобильных лиц за габариты принимается прямоугольник длиной 1,2 м и шириной 0,8 м. Задаются координаты каждого человека x_i – расстояние от центра эллипса до конца эвакуационного участка, на котором он находится (рис. 20).

Координаты каждого человека x_i в начальный момент времени задаются в соответствии со схемой расстановки людей в помещениях (рабочие места, спальные места и т.п.). В случае отсутствия таких данных, допускается размещать людей равномерно по всей площади помещения с учетом расстановки технологического оборудования.

Координата каждого человека в момент времени t определяется по формуле:

$$x_i(t) = x_i(t-\Delta t) - V_i(t) \cdot \Delta t \quad \text{м}, \quad (8)$$

где $x_i(t-\Delta t)$ – координата i -го человека в предыдущий момент времени, м;

$V_i(t)$ – скорость i -го человека в момент времени t , м/с;

Δt – промежуток времени, с.

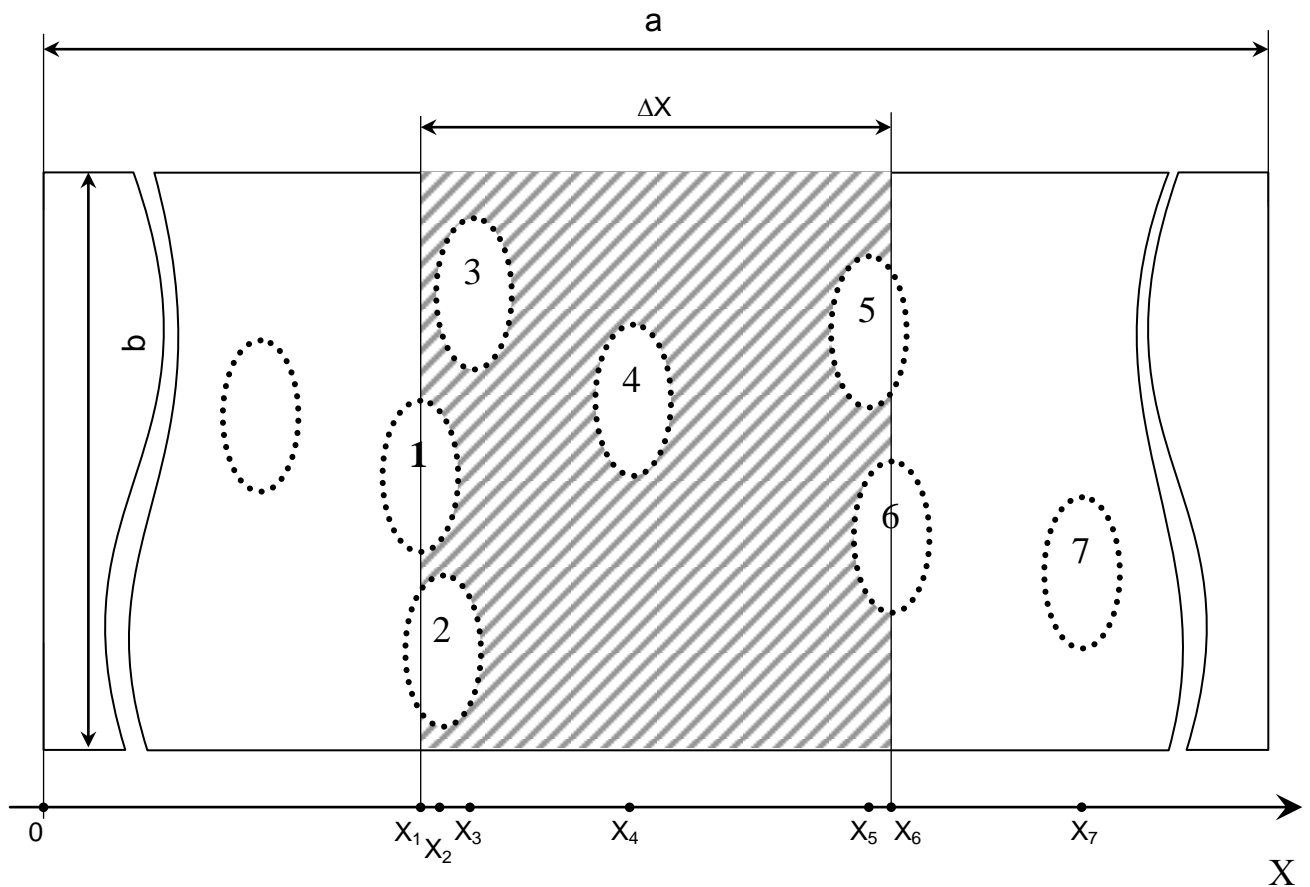


Рис. 20. Координатная схема размещения людей на путях эвакуации

Скорость i -го человека $V_i(t)$ в момент времени t определяется по таблице 1 в зависимости от локальной плотности потока, в котором он движется, $D_i(t)$ и типа эвакуационного участка.

Таблица 1.

Плотность потока $D, \text{м}^2 \cdot \text{м}^2$	Горизонтальный путь		Дверной проем, интенсивность $q, \text{м} \cdot \text{мин}^{-1}$
	Скорость $V,$ $\text{м} \cdot \text{мин}^{-1}$	Интенсивность, $q,$ $\text{м} \cdot \text{мин}^{-1}$	
0,01	100	1	1
0,05	100	5	5
0,1	80	8	8,7
0,2	60	12	13,4
0,3	47	14,1	16,5
0,4	40	16	18,4
0,5	33	16,5	19,6
0,7	23	16,1	18,5
0,8	19	15,2	17,3
0,9 и более	15	13,5	8,5

Примечание. Табличное значение интенсивности движения в дверном проеме при плотности потока 0,9 и более, равное $8,5 \text{ м} \cdot \text{мин}^{-1}$, установлено для дверного проема шириной 1,6 м и более, а при дверном проеме меньшей ширины d интенсивность движения следует определять по формуле $q = 2,5 + 3,75 \cdot d$.

Локальная плотность $D_i(t)$ вычисляется по группе, состоящей из n человек, по формуле:

$$D_i(t) = (n(t)-1) \cdot f / (b \cdot \Delta x) \quad \text{м}^2/\text{м}^2, \quad (9)$$

где n – количество людей в группе, человек;

f – средняя площадь горизонтальной проекции человека, $\text{м}^2/\text{м}^2$;

b – ширина эвакуационного участка, м;

Δx – разность координат последнего и первого человека в группе, м.

Если в момент времени t координата человека $x_i(t)$, определенная по формуле (8), станет отрицательной – это означает, что человек достиг границы текущего эвакуационного участка и должен перейти на следующий эвакуационный участок.

В этом случае координата этого человека на следующем эвакуационном участке определяется:

$$x_i(t) = [x_i(t-dt) - V_i(t) \cdot dt] + a_j - l_j \quad \text{м}, \quad (10)$$

где $x_i(t-dt)$ – координата i -го человека в предыдущий момент времени на $(j-1)$ эвакуационном участке, м;

$V_i(t)$ – скорость i -го человека на $(j-1)$ -ом эвакуационном участке в момент времени t , м/с;

a_j – длина j -го эвакуационного участка, м;

l_j – координата места слияния j -го и $(j-1)$ -го эвакуационных участков – расстояние от начала j -го эвакуационного участка до места слияния его с $(j-1)$ -ым эвакуационным участком, м.

Количество людей, переходящих с одного эвакуационного участка на другой в единицу времени, определяется пропускной способностью выхода с участка $Q_j(t)$:

$$Q_j(t) = q_j(t) \cdot c_j \cdot dt / (f \cdot 60) \quad \text{чел.}, \quad (11)$$

где $q_j(t)$ – интенсивность движения на выходе с j -го эвакуационного участка в момент времени t , м/мин;

c_j – ширина выхода с j -го эвакуационного участка, м;

dt – промежуток времени, с;

f – средняя площадь горизонтальной проекции человека, м².

Интенсивность движения на выходе с j -го эвакуационного участка $q_j(t)$ в момент времени t определяется в зависимости от плотности людского потока на этом участке $Dv_j(t)$.

Плотность людского потока на j -ом эвакуационном участке $Dv_j(t)$ в момент времени t определяется по формуле:

$$Dv_j(t) = (N_j \cdot f \cdot dt) / (a_j \cdot b_j) \text{ м}^2/\text{м}^2,$$

где N_j – число людей на j -ом эвакуационном участке, чел.;

f – средняя площадь горизонтальной проекции человека, м^2 ;

a_j – длина j -го эвакуационного участка, м;

b_j – ширина j -го эвакуационного участка, м;

dt – промежуток времени, с.

В момент времени t определяется количество людей m с отрицательными координатами $x_i(t)$, определенными по формуле (8). Если значение $m \leq Q_j(t)$, то все m человек переходят на следующий эвакуационный участок и их координаты определяются в соответствии с формулой (10). Если значение $m > Q_j(t)$, то количество человек равное значению $Q_j(t)$ переходят на следующий эвакуационный участок и их координаты определяются в соответствии с формулой (10), а количество человек, равное значению $(m - Q_j(t))$, не переходят на следующий эвакуационный участок (остаются на данном эвакуационном участке) и их координатам присваиваются значения $x_i(t) = k \cdot 0,25 + 0,25$, где k – номер ряда, в котором будут находиться люди (максимально возможное количество человек в одном ряду сбоку друг от друга для каждого эвакуационного участка определяется перед началом расчетов). Таким образом, возникает скопление людей перед выходом с эвакуационного участка.

На основании заданных начальных условий (начальных координат людей, параметров эвакуационных участков) определяются плотности людских потоков на путях эвакуации и пропускные способности выходов с эвакуационных участков. Далее, в момент времени $t = t + dt$, выбирается направление движения каждого человека и вычисляется новая координата каждого человека. После этого снова определяются плотности людских потоков на путях эвакуации и пропускные способности выходов. Затем вновь дается приращение по времени dt и определяются новые координаты людей с учетом наличия ОФП на путях эвакуации в этот момент времени. После этого процесс повторяется. Расчеты проводятся до тех пор, пока все люди не будут эвакуированы из здания.

В соответствии с вышеизложенной методикой создан алгоритм по определению характеристик процесса эвакуации.

Площадь горизонтальной проекции принималась – 0,125 м²/чел. (таблица П5.3 Методики [15]).

Интенсивность и скорость движения людского потока на разных участках путей эвакуации в зависимости от плотности принималась в соответствии с таблицей П 2.1 Методики [15].

Параметры путей эвакуации (длина, ширина, уклон) принимались согласно предоставленной «Схеме расположения погибших».

В связи с отсутствием данных о количестве и местах расположения людей на момент начала пожара, количество людей принималось исходя из средней загруженности рассматриваемых помещений:

- в каждом зале кинотеатра 100 человек (итого 300 человек);
- в игровой комнате 49 человек;
- на катке 30 человек;
- в фитнесе с бассейном 75 человек;
- в бильярдной и баре 66 человек;
- в игровой зоне у кинотеатров, а также в баре 150 человек.
- в подсобны и служебных помещениях, кассах и т.п. 23 человека.

Общее количество людей на этаже, при проведении моделирования эвакуации, было принято 693 человека.

При проведении моделирования эвакуации принималось что с этажа пожара предусмотрено четыре эвакуационных выхода, ведущие в эвакуационные лестничные клетки.

Моделирования эвакуации людей относящихся к маломобильным группам населения (МГН) не проводилось ввиду отсутствия данных о нахождении данного типа людей в здании на момент пожара.

При моделировании движения людей из рассматриваемых помещений в описании эвакуационной схемы задавалось наиболее предпочтительное (наиболее вероятное) направление движения людей к эвакуационным выходам. Предполагалось, что при эвакуации из помещения люди движутся в сто-

рону ближайших к ним выходов, за исключением случая, когда ближайший выход блокирован опасными факторами пожара.

Вариант 1. Эвакуация людей с 4 этажа в эвакуационные выходы В1, В2, В3, В5 и В6, выход В4 блокирован с первых секунд пожара.

Время эвакуации людей с четвертого этажа составило 145 секунд.

Время эвакуации людей в выход В1 составляет 74 с.

Время эвакуации людей в выход В2 составляет 98 с.

Время эвакуации людей в выход В3 составляет 76 с.

Время эвакуации людей в выход В5 составляет 145 с.

Время эвакуации людей в выход В6 составляет 61 с.

Динамика эвакуации людей представлена на рис. 21–36.

Вариант 2. Эвакуация людей с 4 этажа в эвакуационные выходы В2 и В3, выходы В1, В4 и В5 закрыты, выход В6 закрыт со стороны игровой зоны и катка.

Время эвакуации людей с четвертого этажа составило 229 секунд.

Время эвакуации людей в выход В1 составляет 229 с.

Время эвакуации людей в выход В2 составляет 183 с.

Динамика эвакуации людей представлена на рис.37–45.

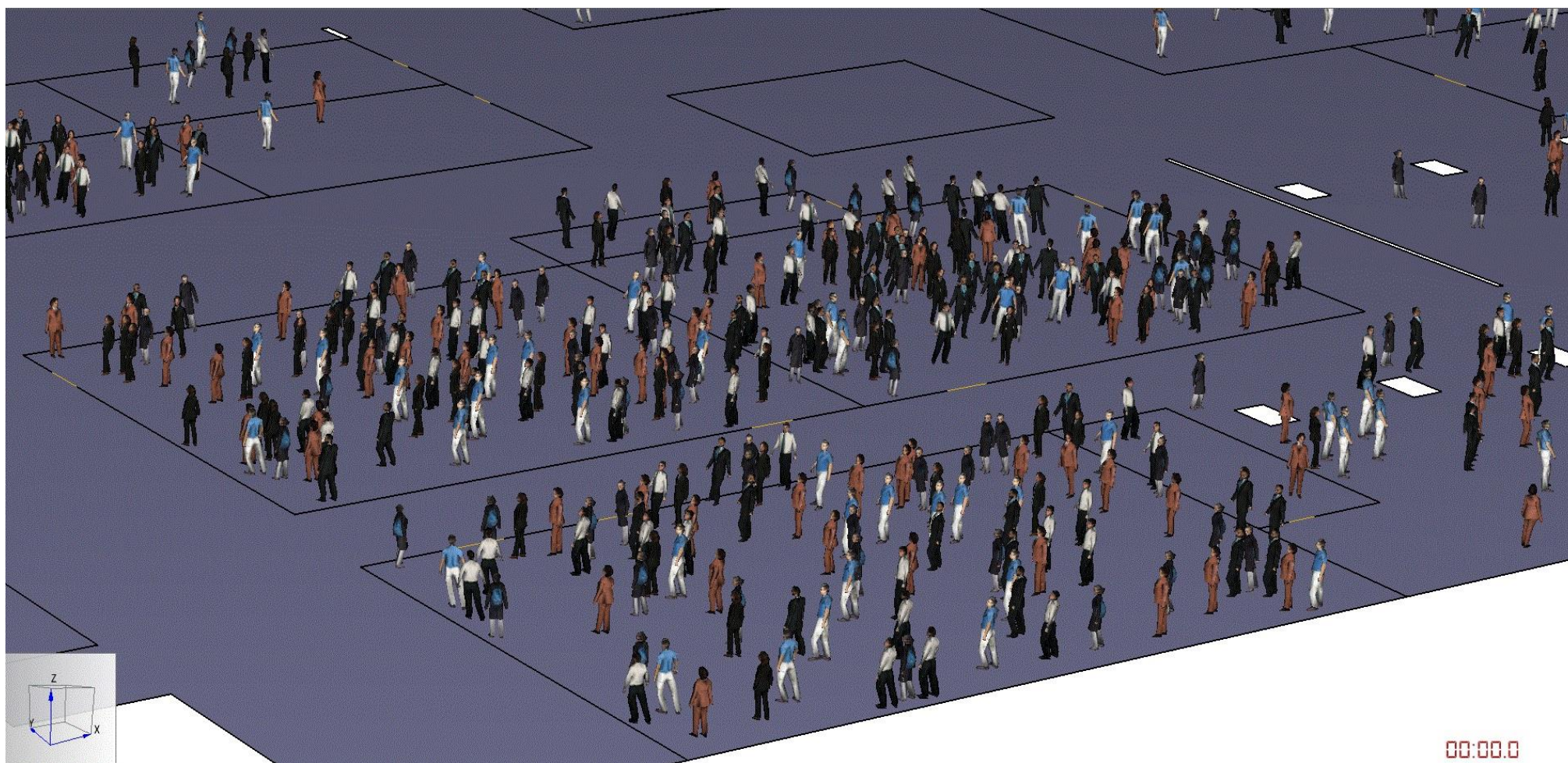


Рис. 21. Расположение людей в кинозалах на момент начала моделирования

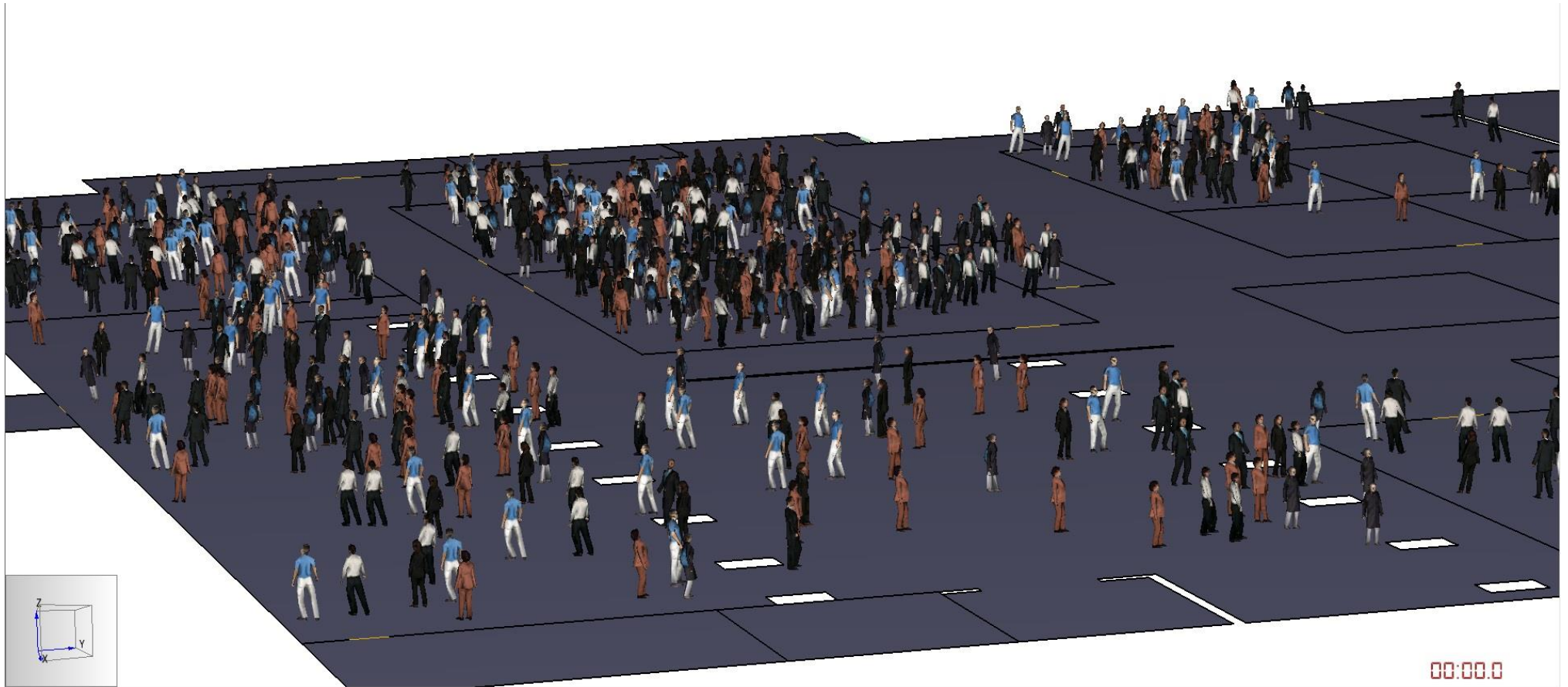


Рис. 22. Расположение людей в игровой зоне на момент начала моделирования

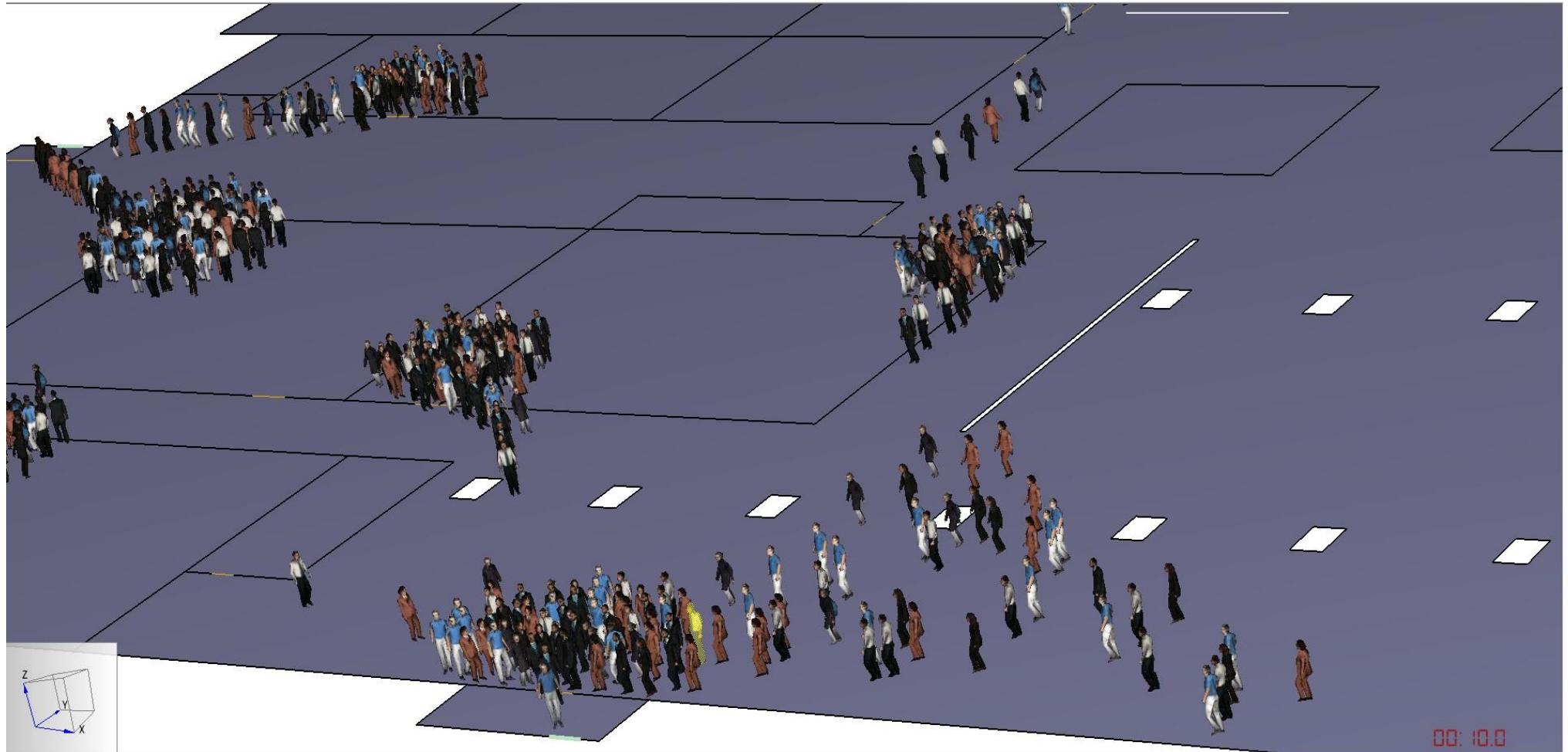


Рис. 23. Динамика движения людей в лестничную клетку на 10 секунде (Вариант 1)



Рис. 24. Образование скоплений перед входом в лестничную клетку (Вариант 1)

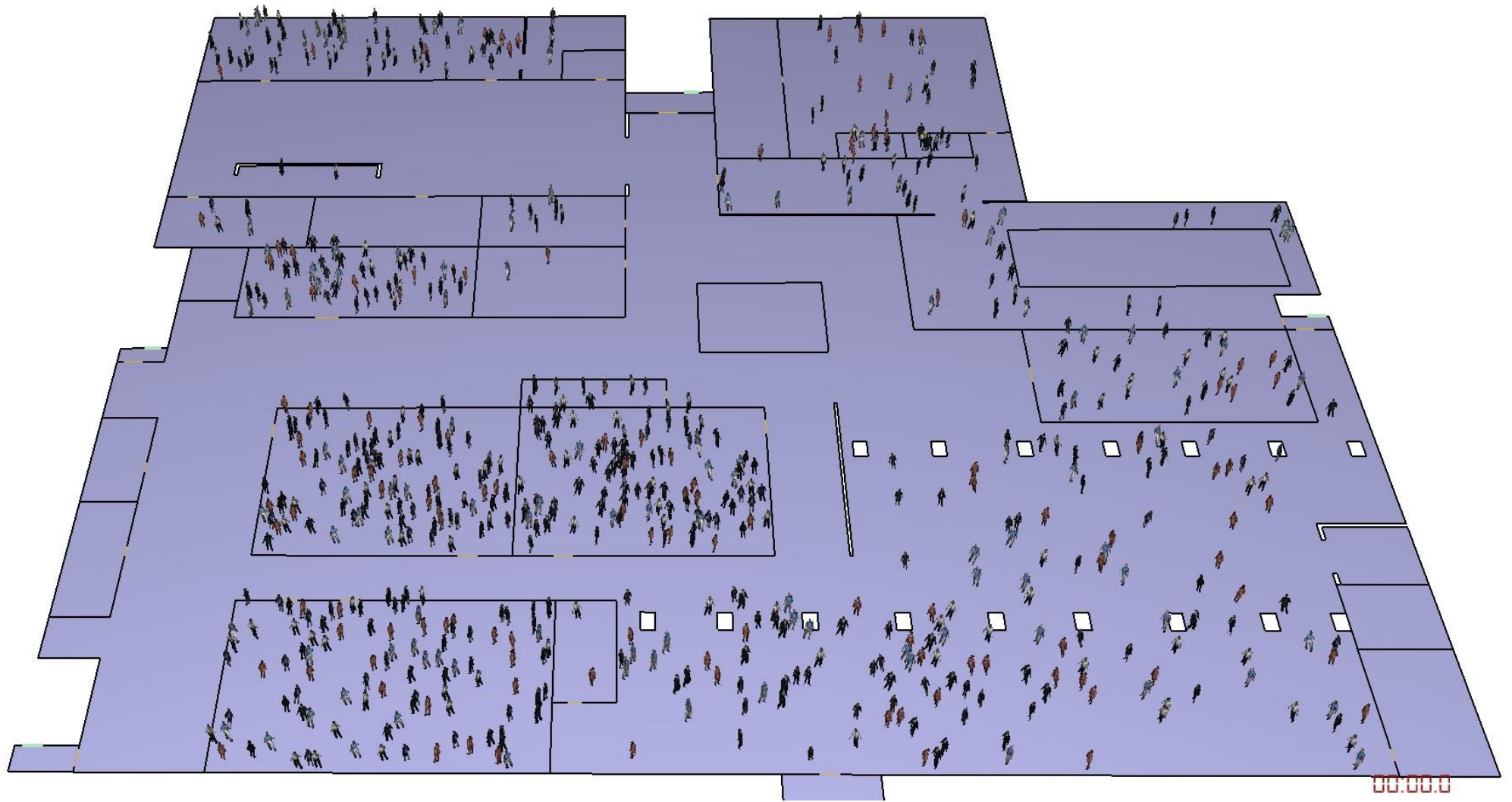


Рис. 25. Расположение людей на 4-ом этаже на момент начала моделирования процесса эвакуации

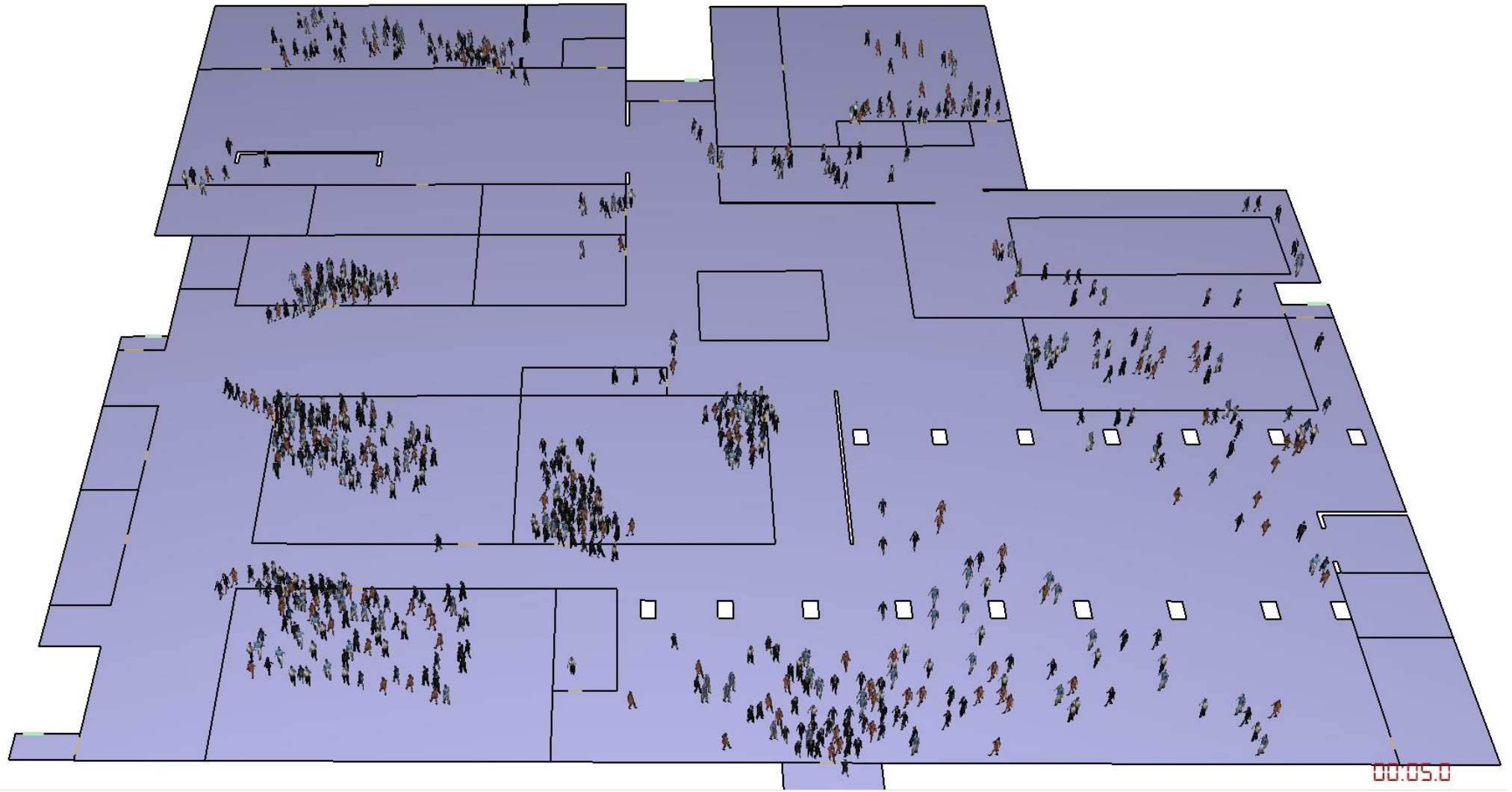


Рис. 26.Динамика движения людей на 5 секунде моделирования (Вариант 1)

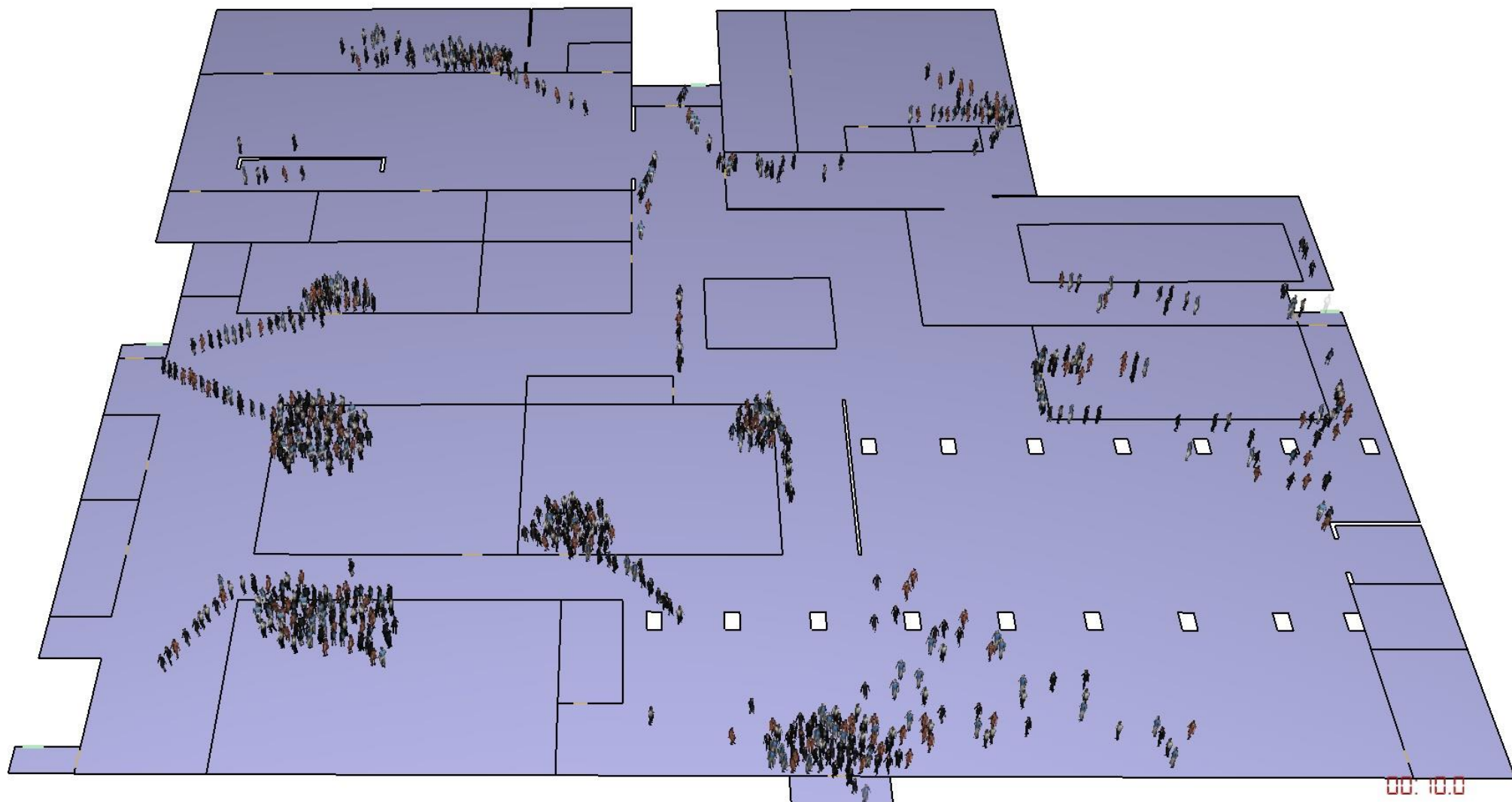


Рис. 27. Динамика движения людей на 10 секунде моделирования (Вариант 1)

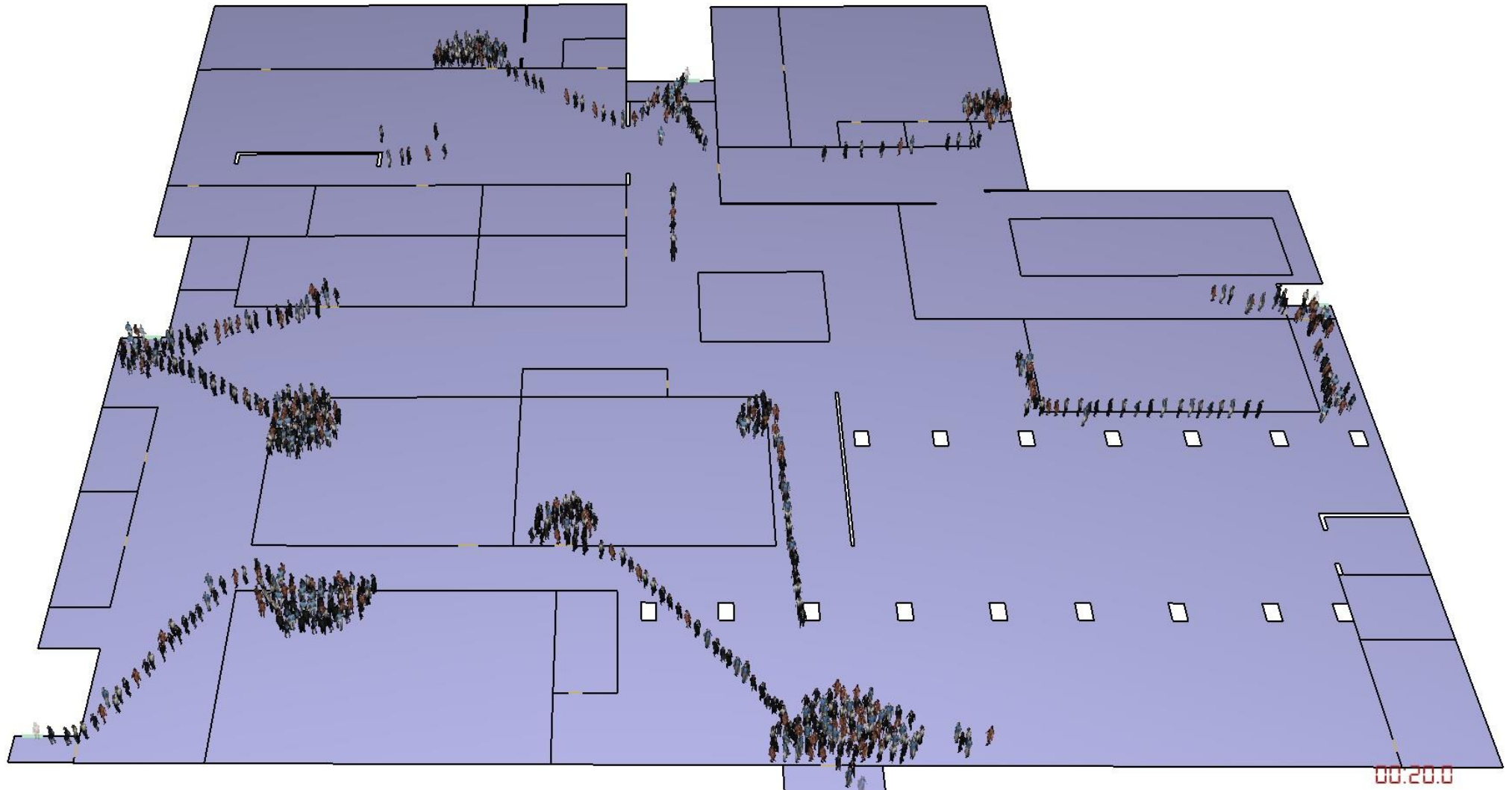


Рис. 28. Динамика движения людей на 20 секунде моделирования (Вариант 1)

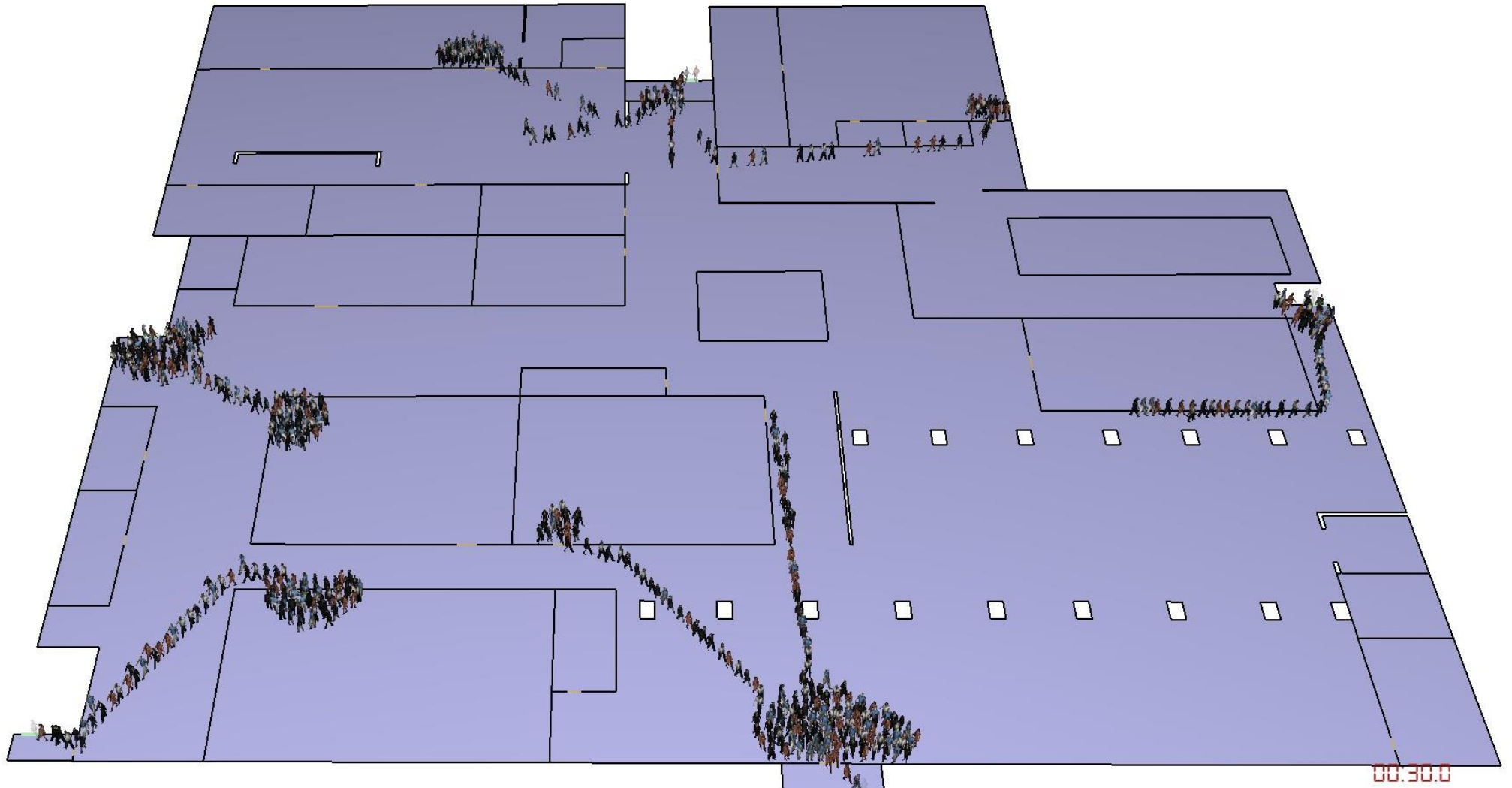


Рис. 29. Динамика движения людей на 30 секунде моделирования (Вариант 1)

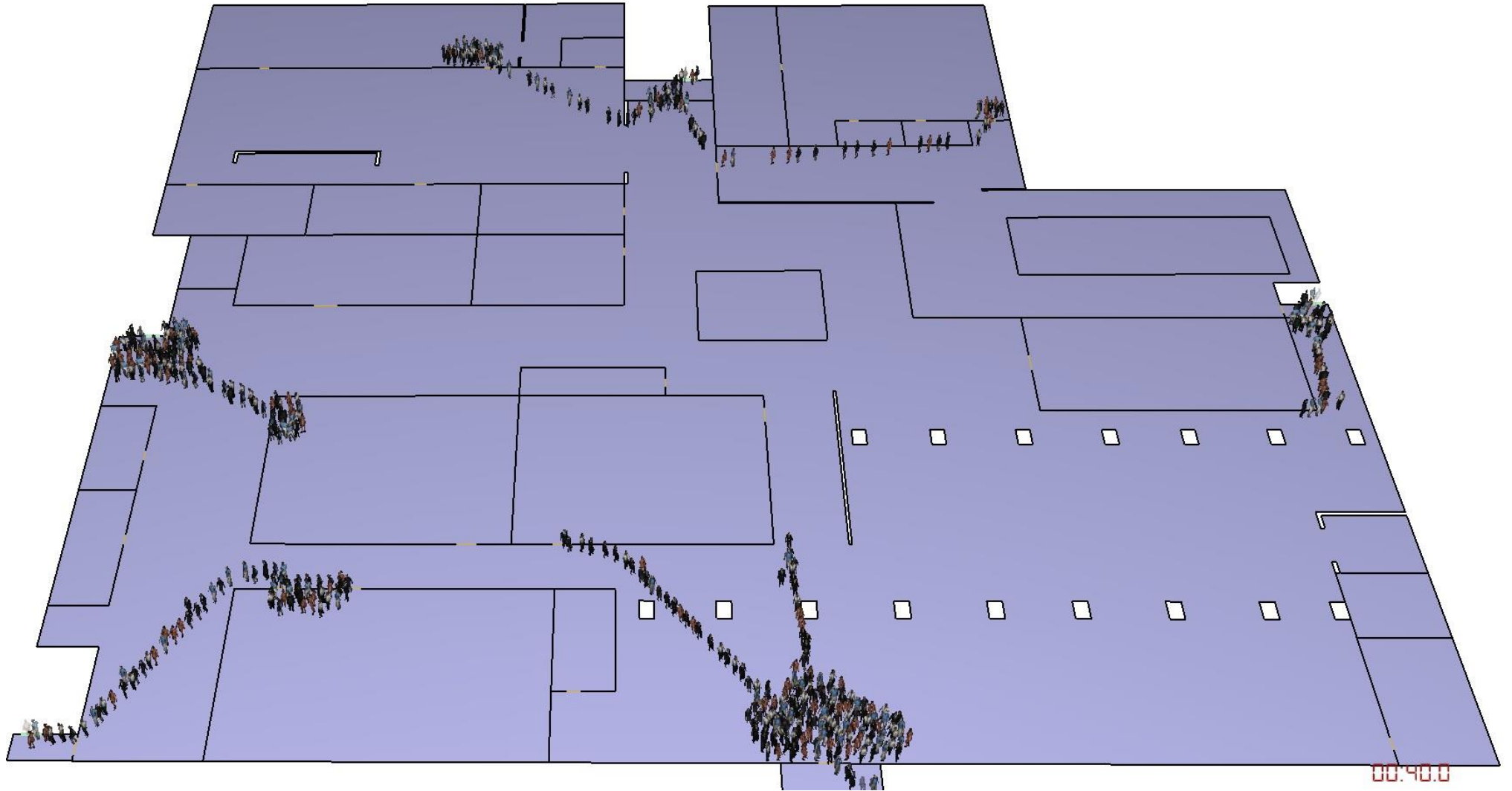


Рис. 30. Динамика движения людей на 40 секунде моделирования (Вариант 1)

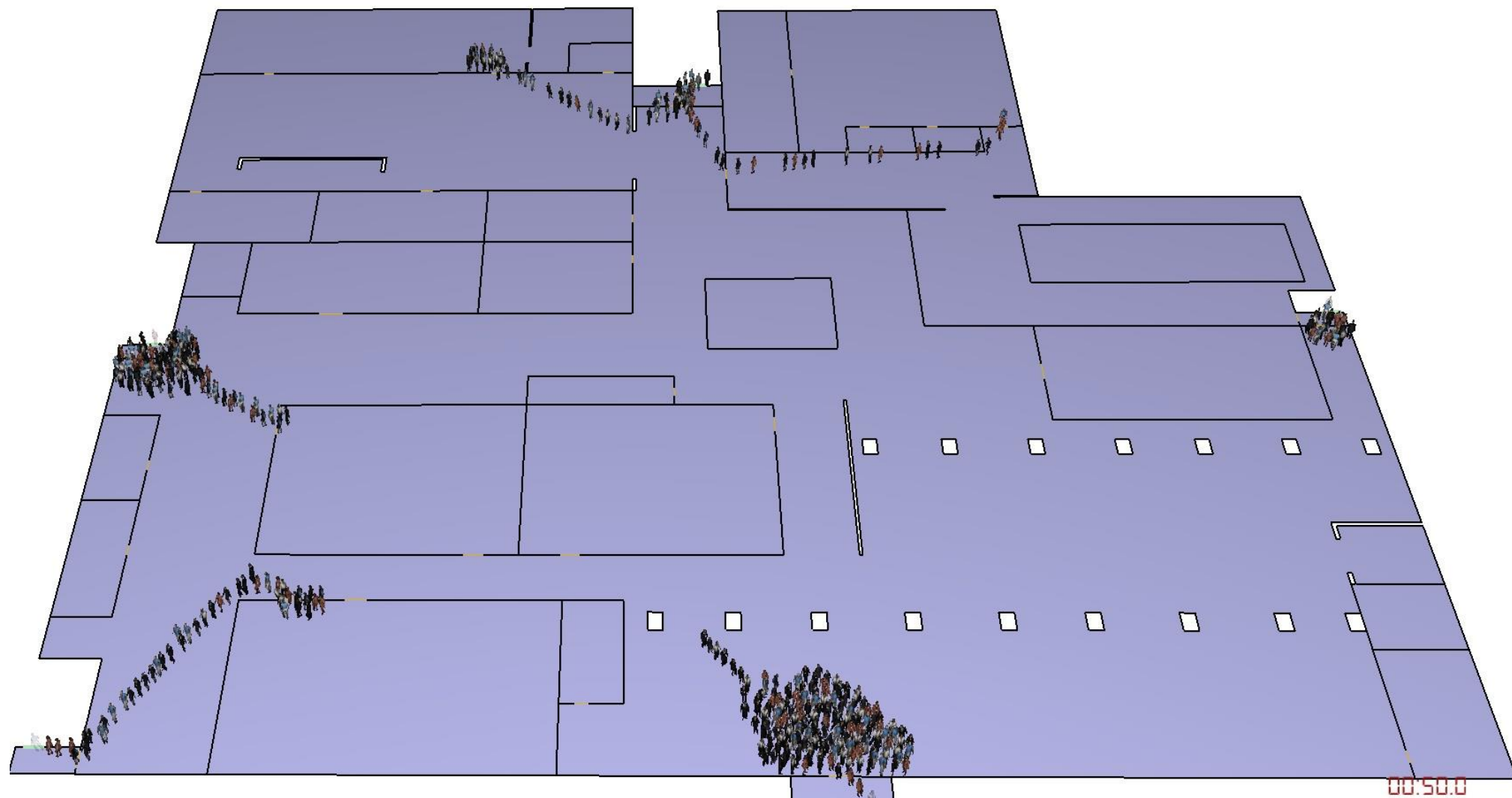


Рис. 31. Динамика движения людей на 50 секунде моделирования (Вариант 1)

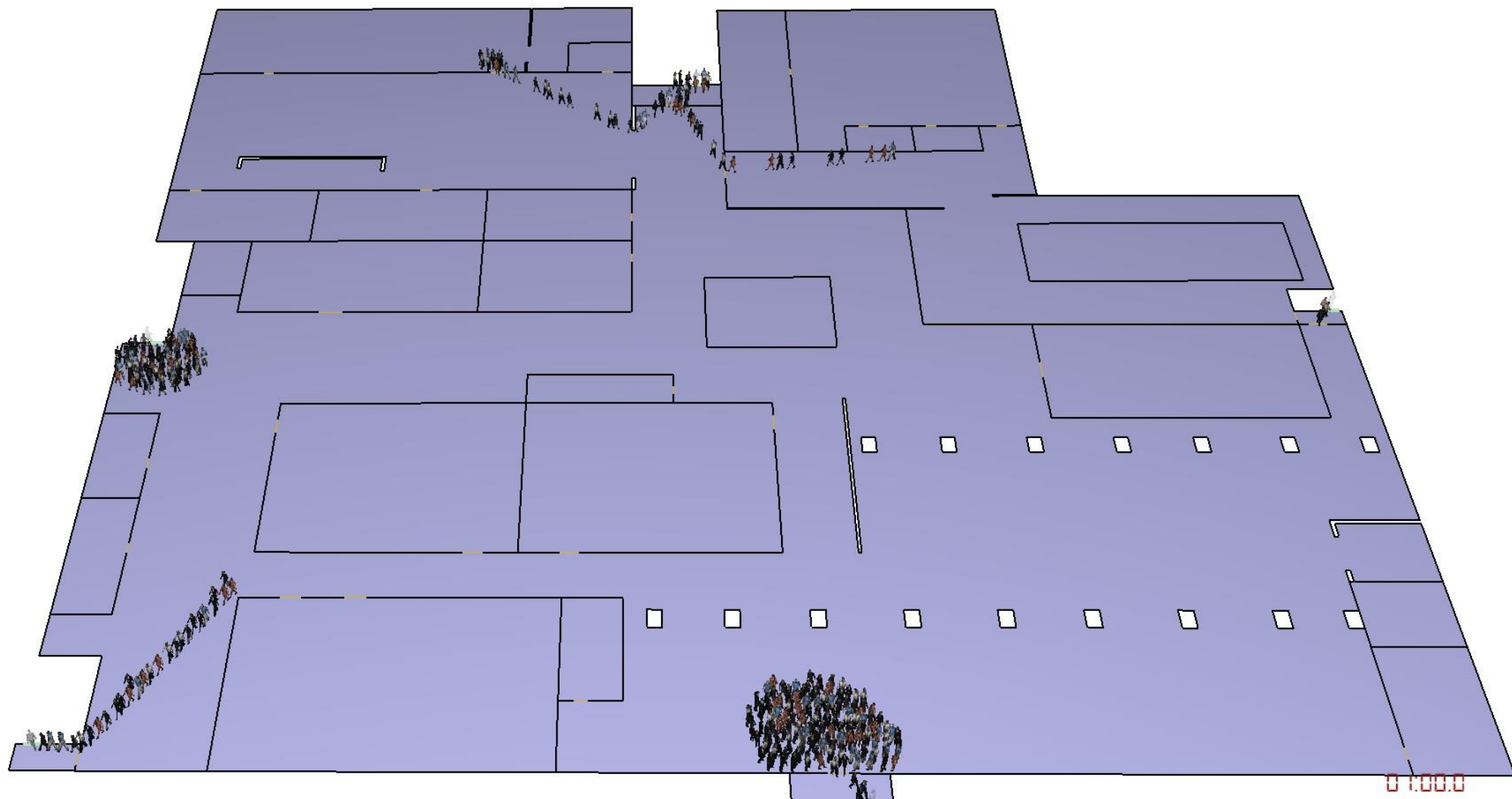


Рис. 32. Динамика движения людей на 60 секунде моделирования (Вариант 1)



Рис. 33. Динамика движения людей на 80 секунде моделирования (Вариант 1)

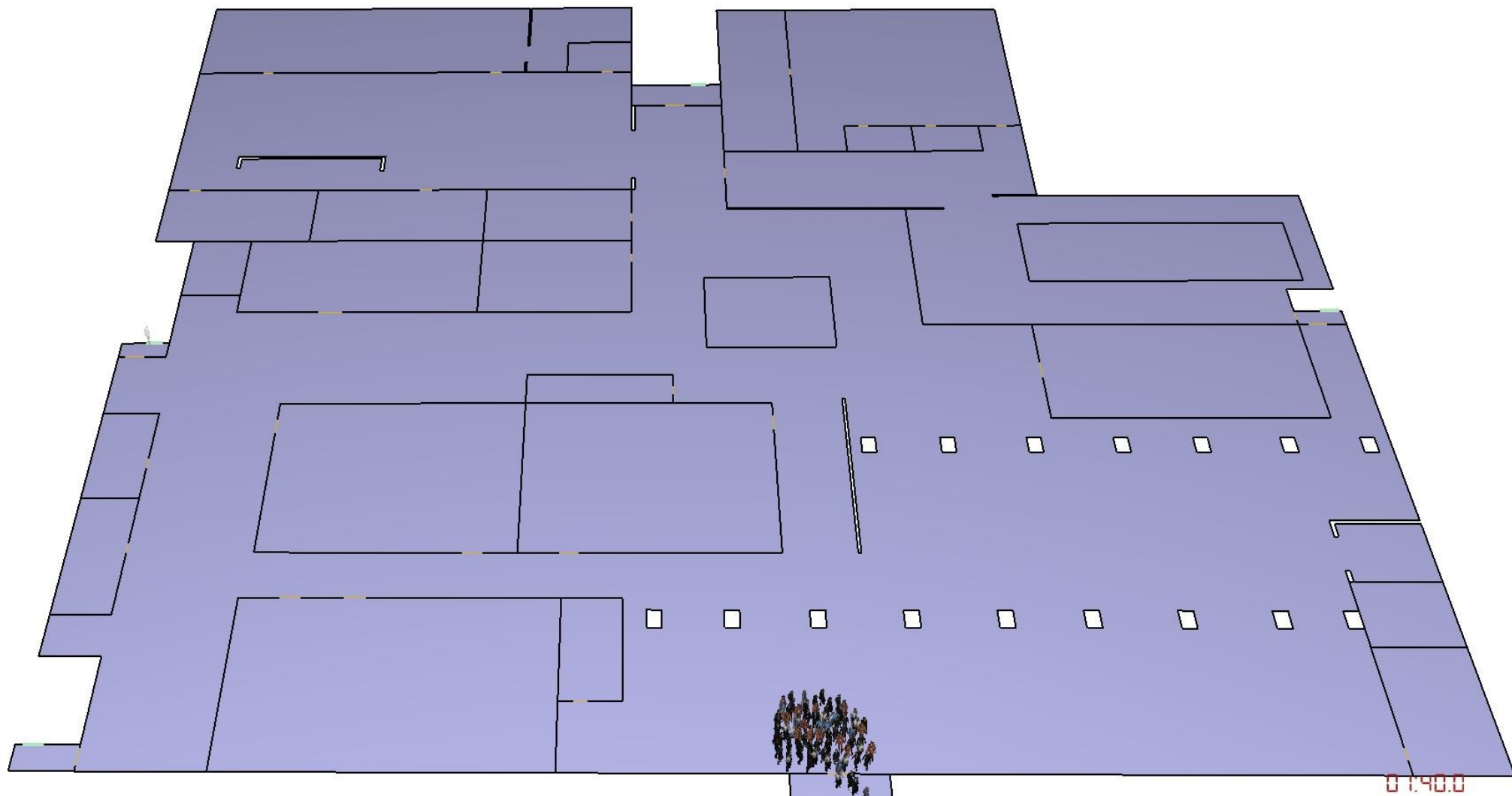


Рис. 34. Динамика движения людей на 100 секунде моделирования (Вариант 1)

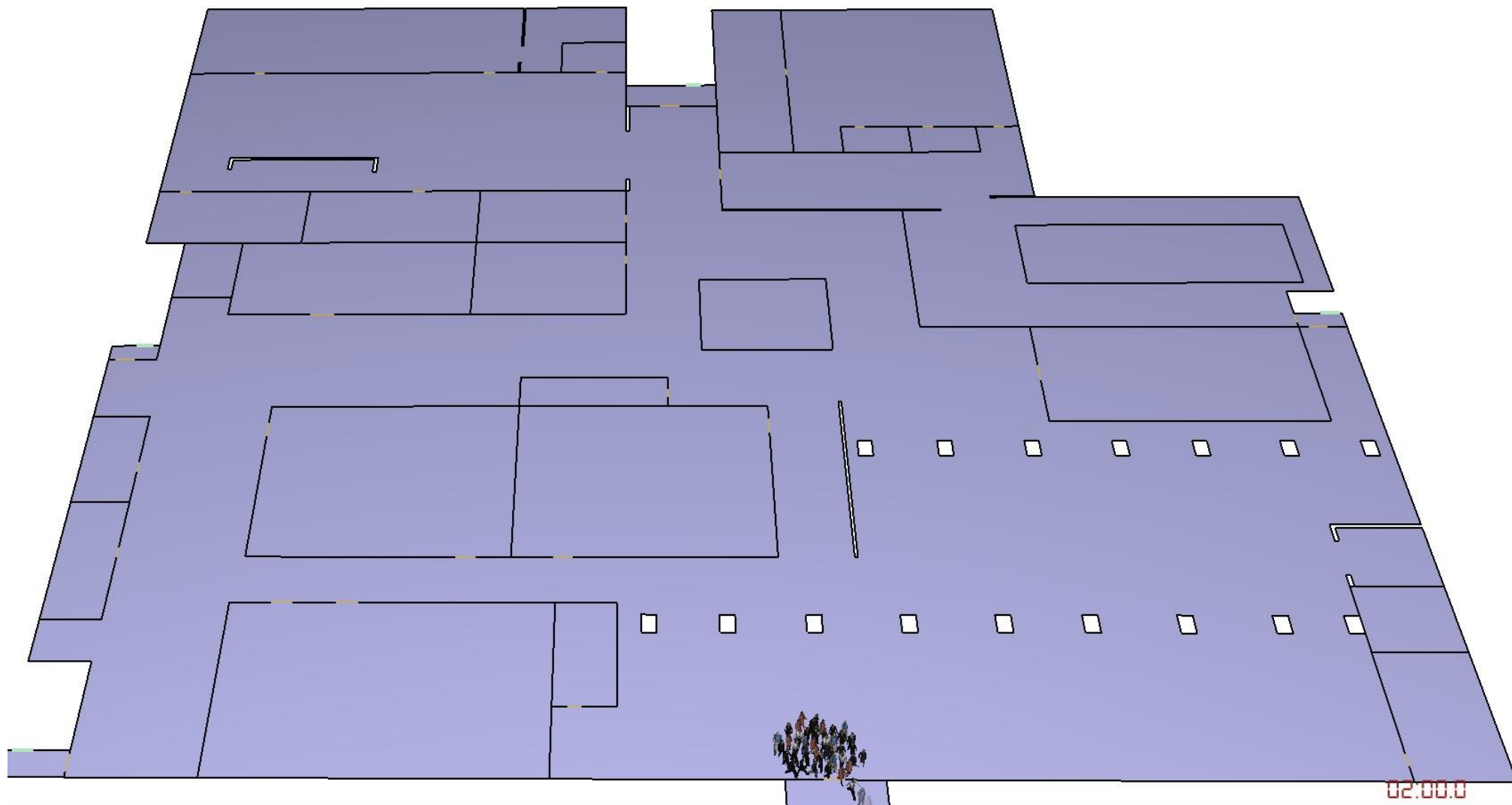


Рис. 35. Динамика движения людей на 120 секунде моделирования (Вариант 1)

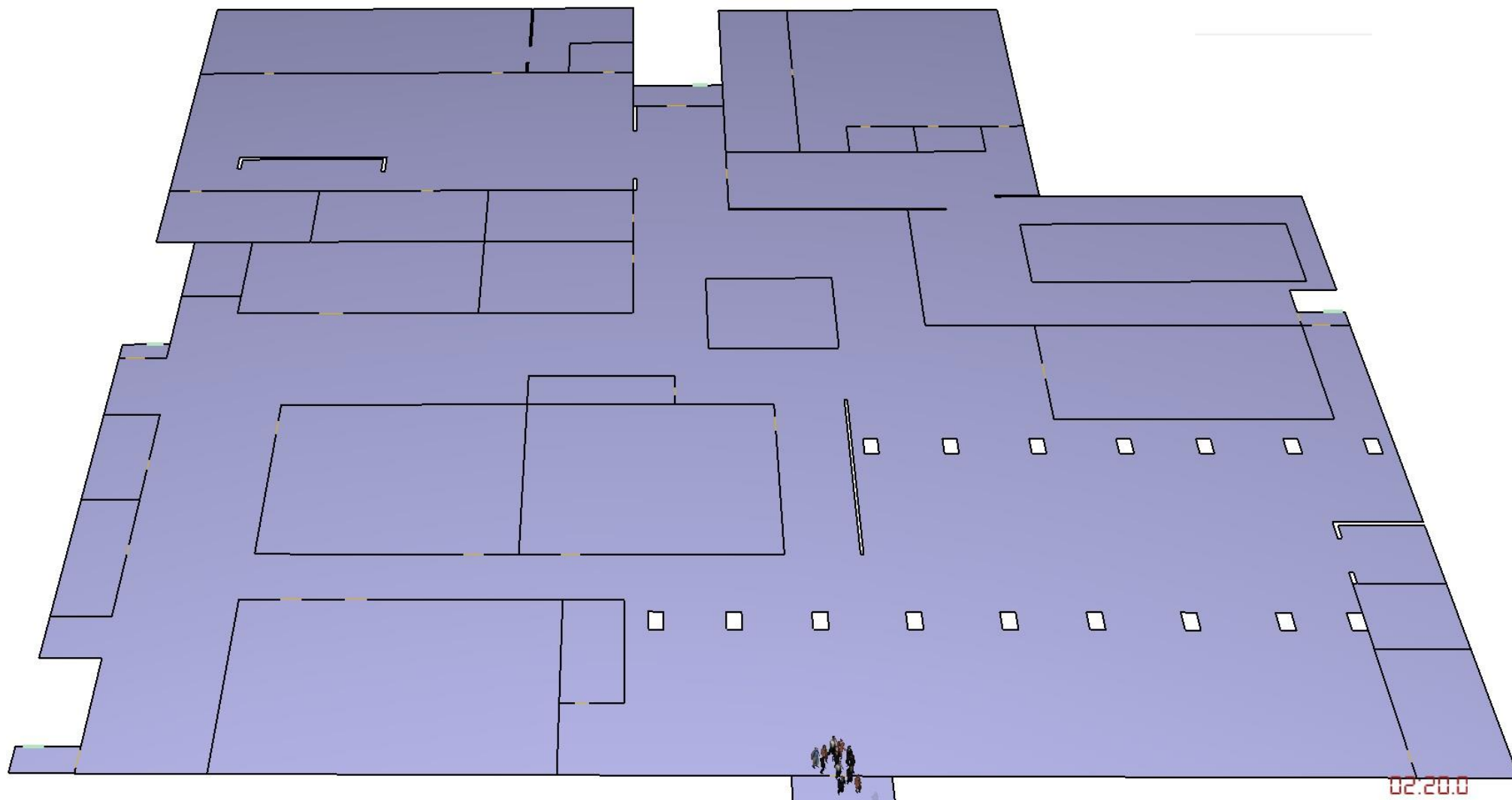


Рис. 36. Динамика движения людей на 140 секунде моделирования (Вариант 1)

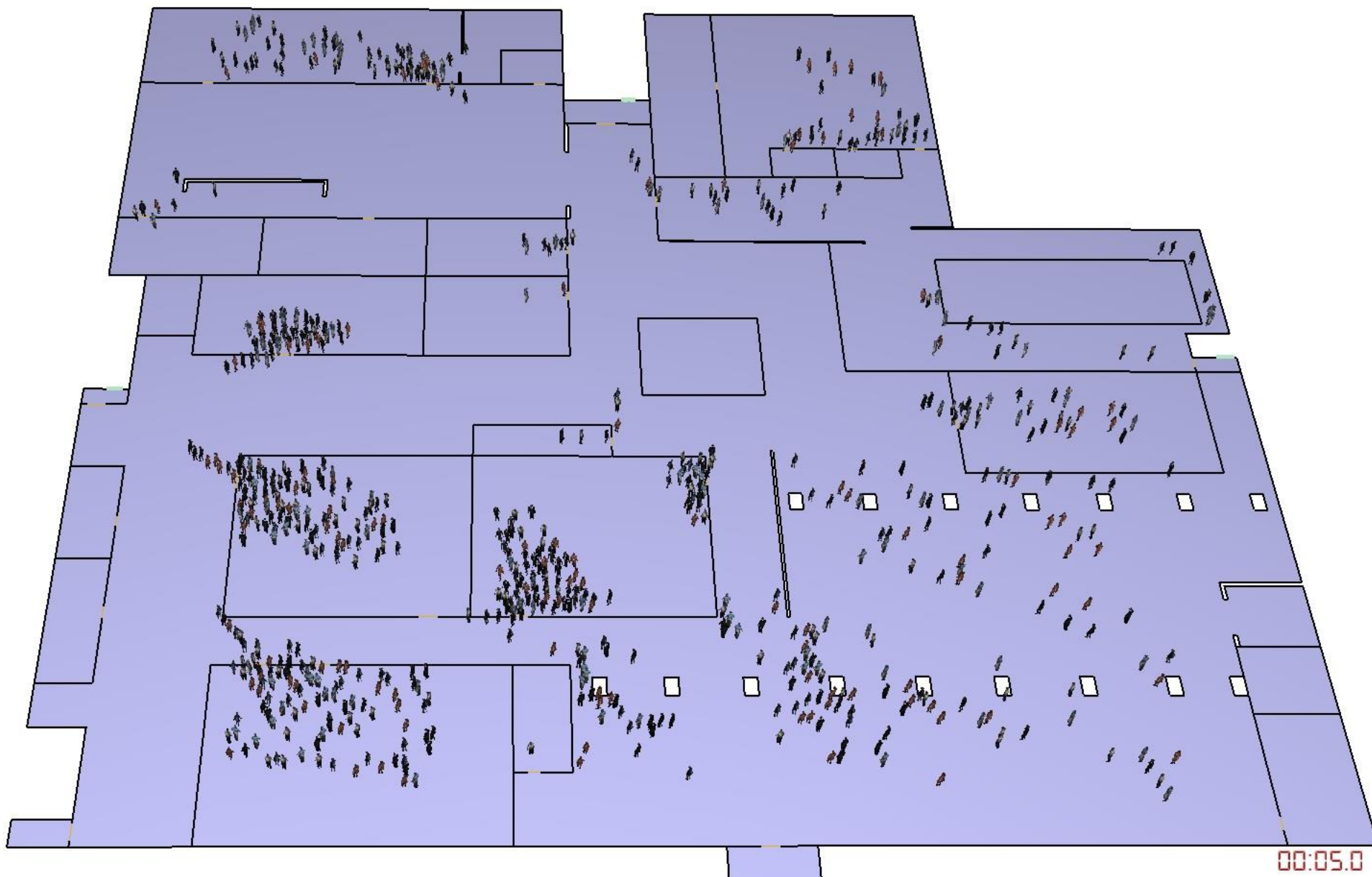


Рис. 37. Динамика движения людей на 5 секунде моделирования (Вариант 2)

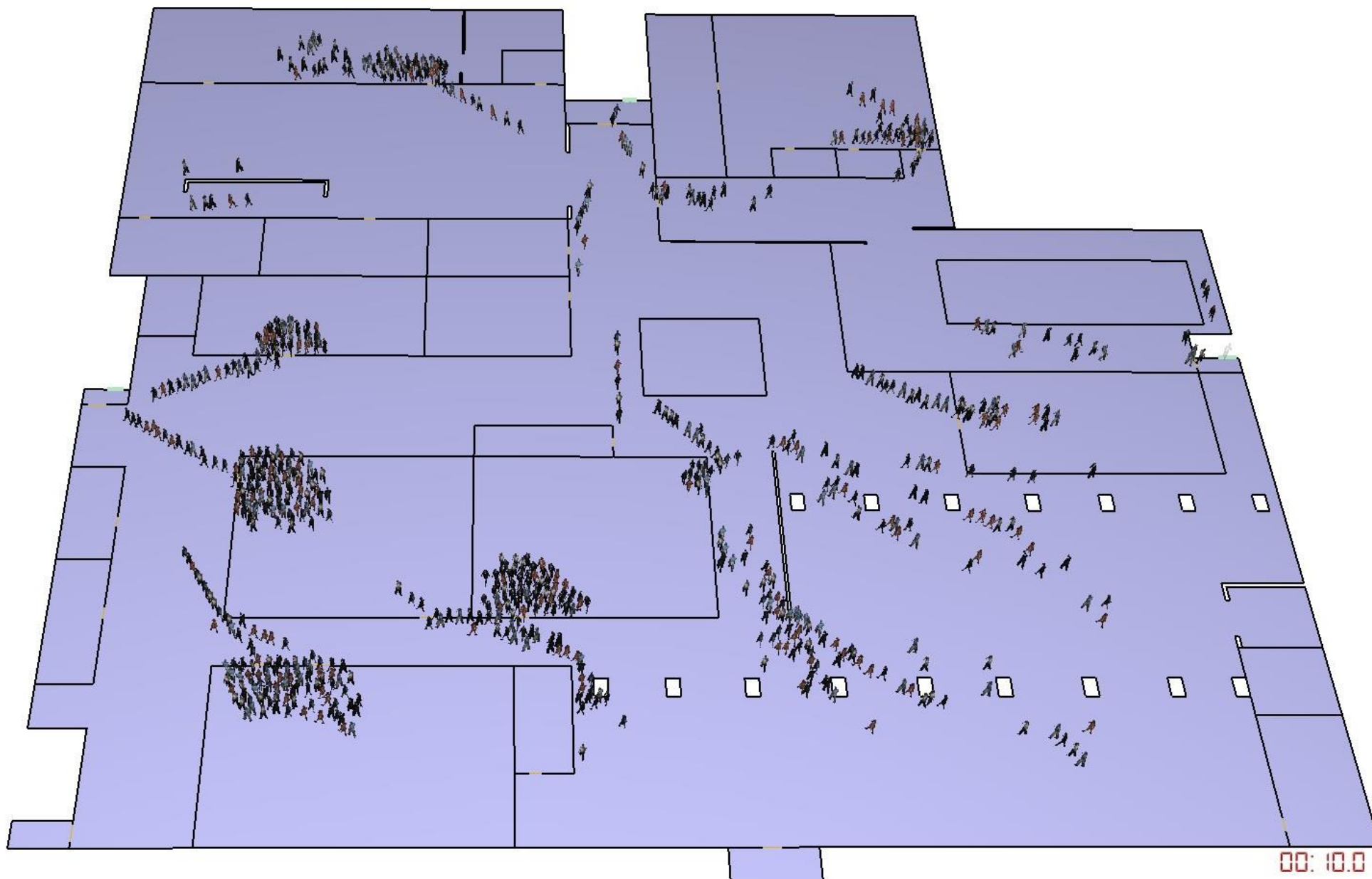


Рис. 38. Динамика движения людей на 10 секунде моделирования (Вариант 2)

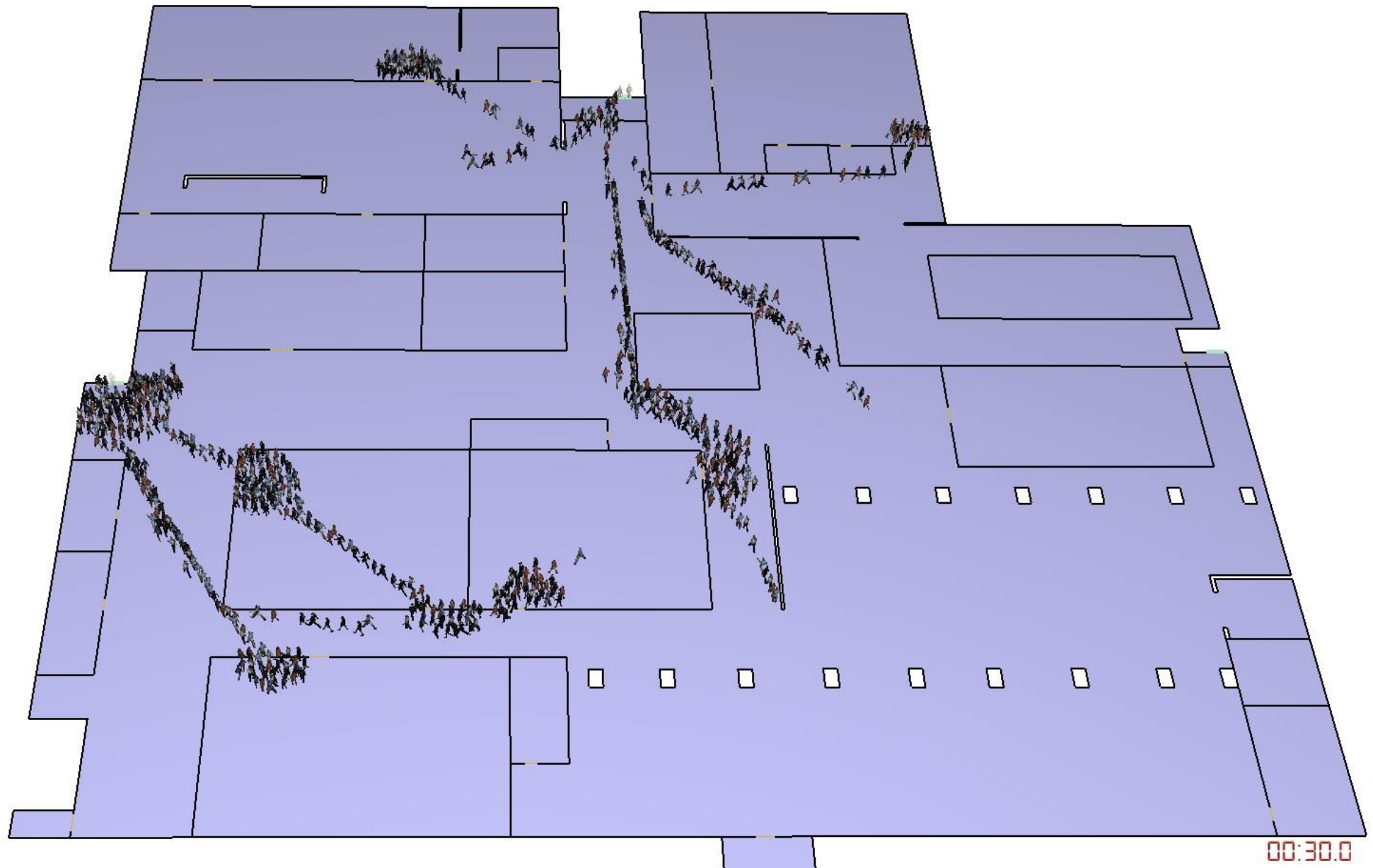


Рис. 39. Динамика движения людей на 30 секунде моделирования (Вариант 2)

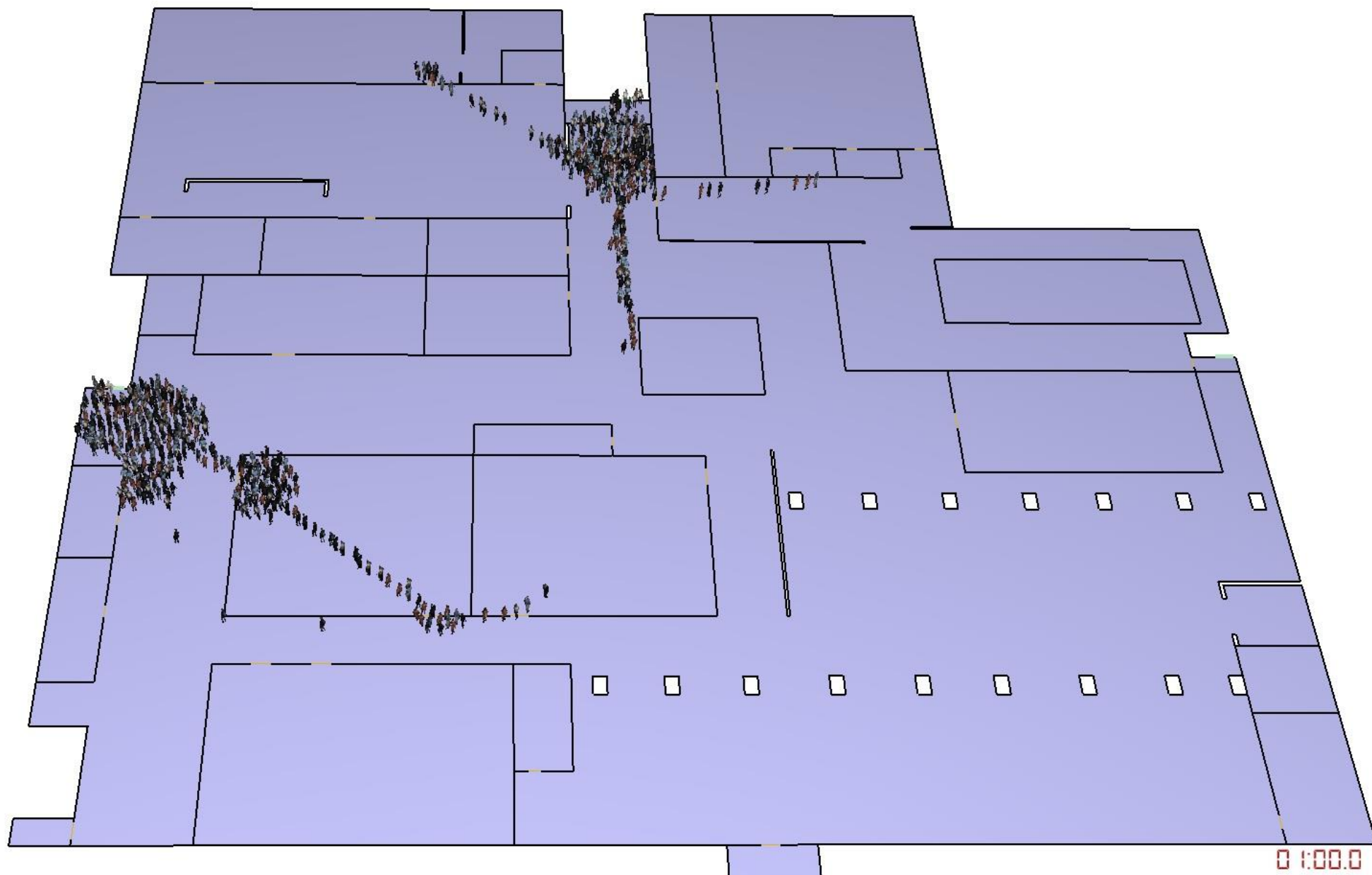


Рис. 40. Динамика движения людей на 60 секунде моделирования (Вариант 2)

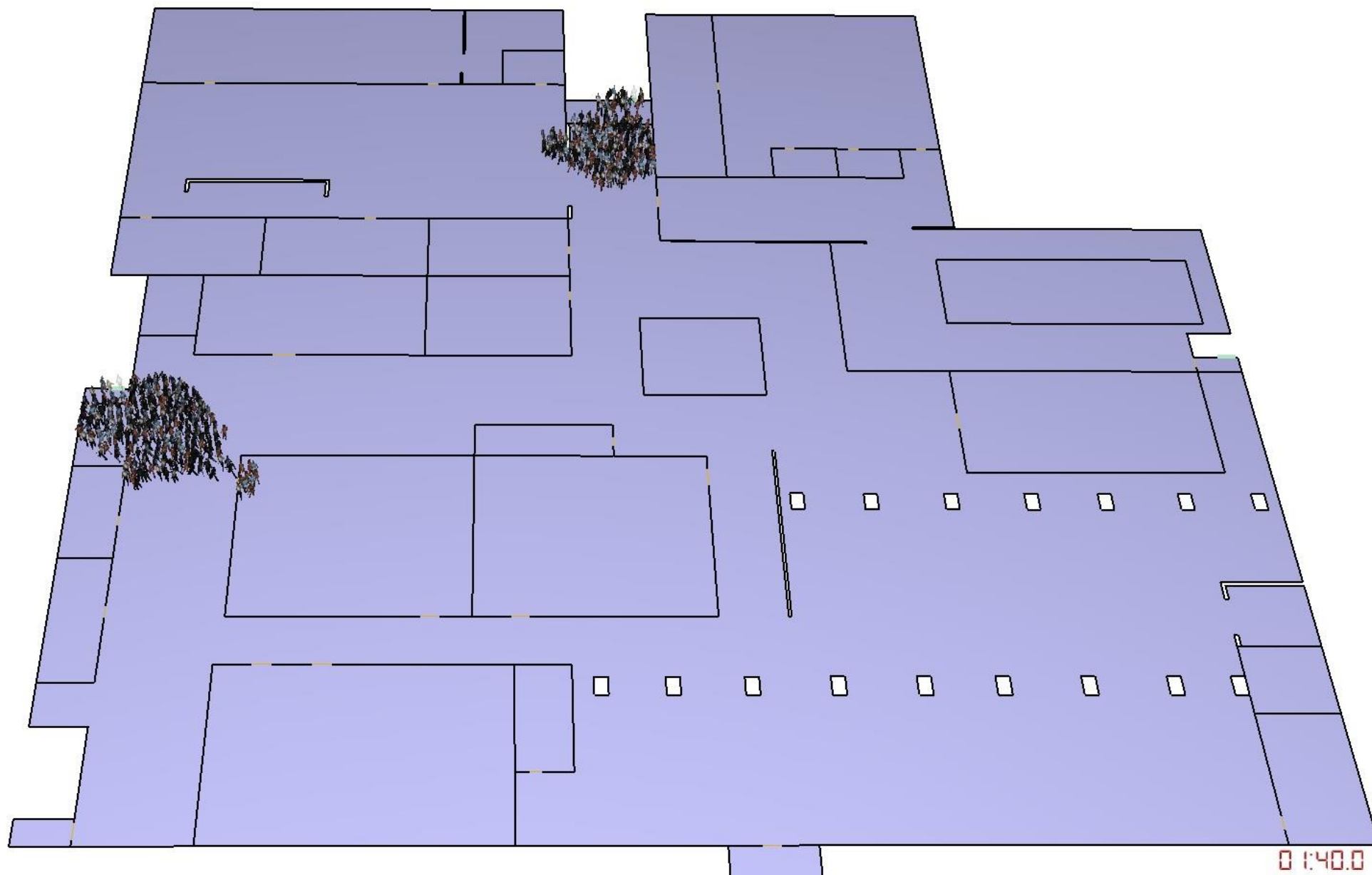


Рис. 41. Динамика движения людей на 100 секунде моделирования (Вариант 2)

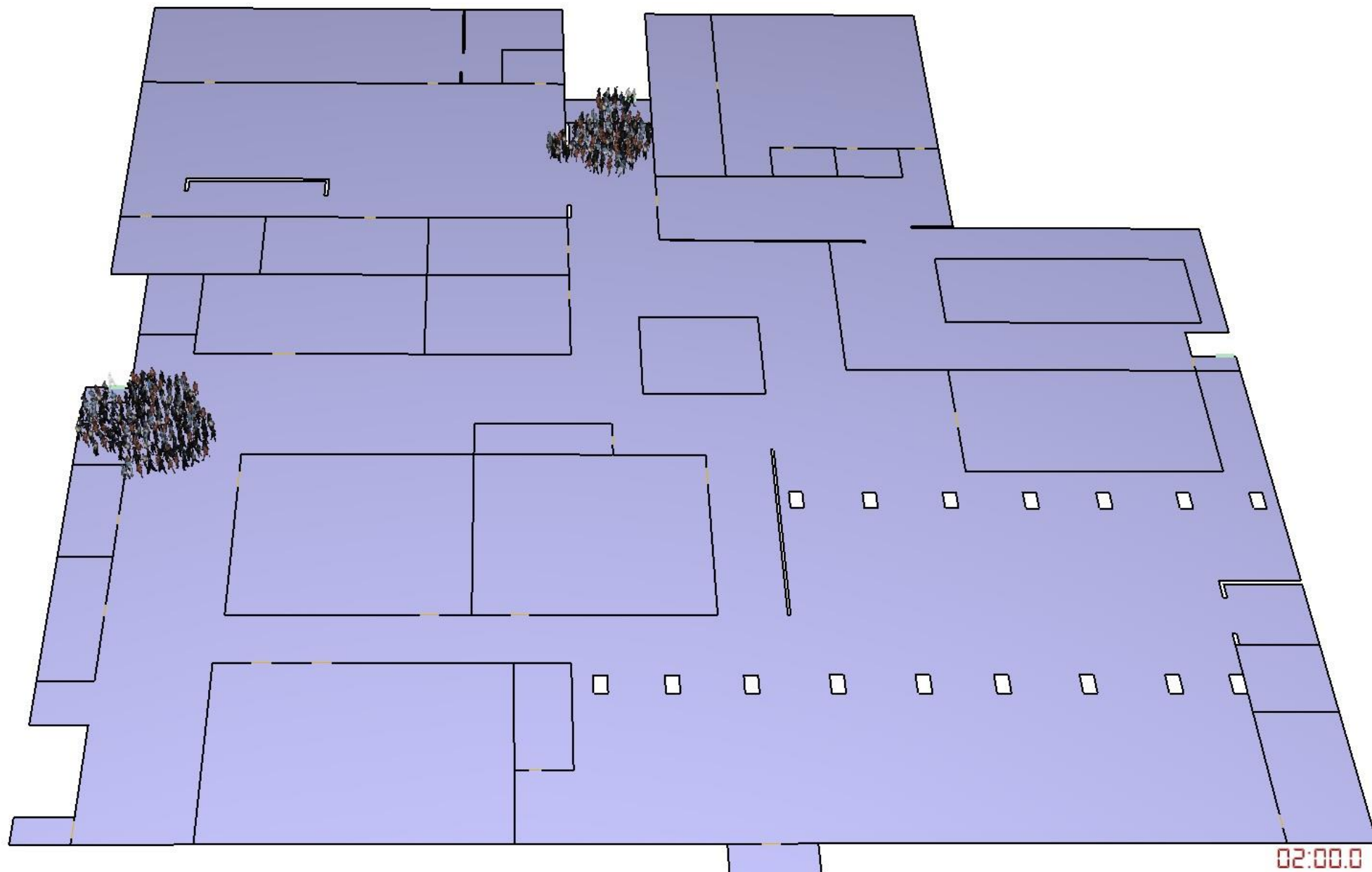


Рис. 42. Динамика движения людей на 120 секунде моделирования (Вариант 2)

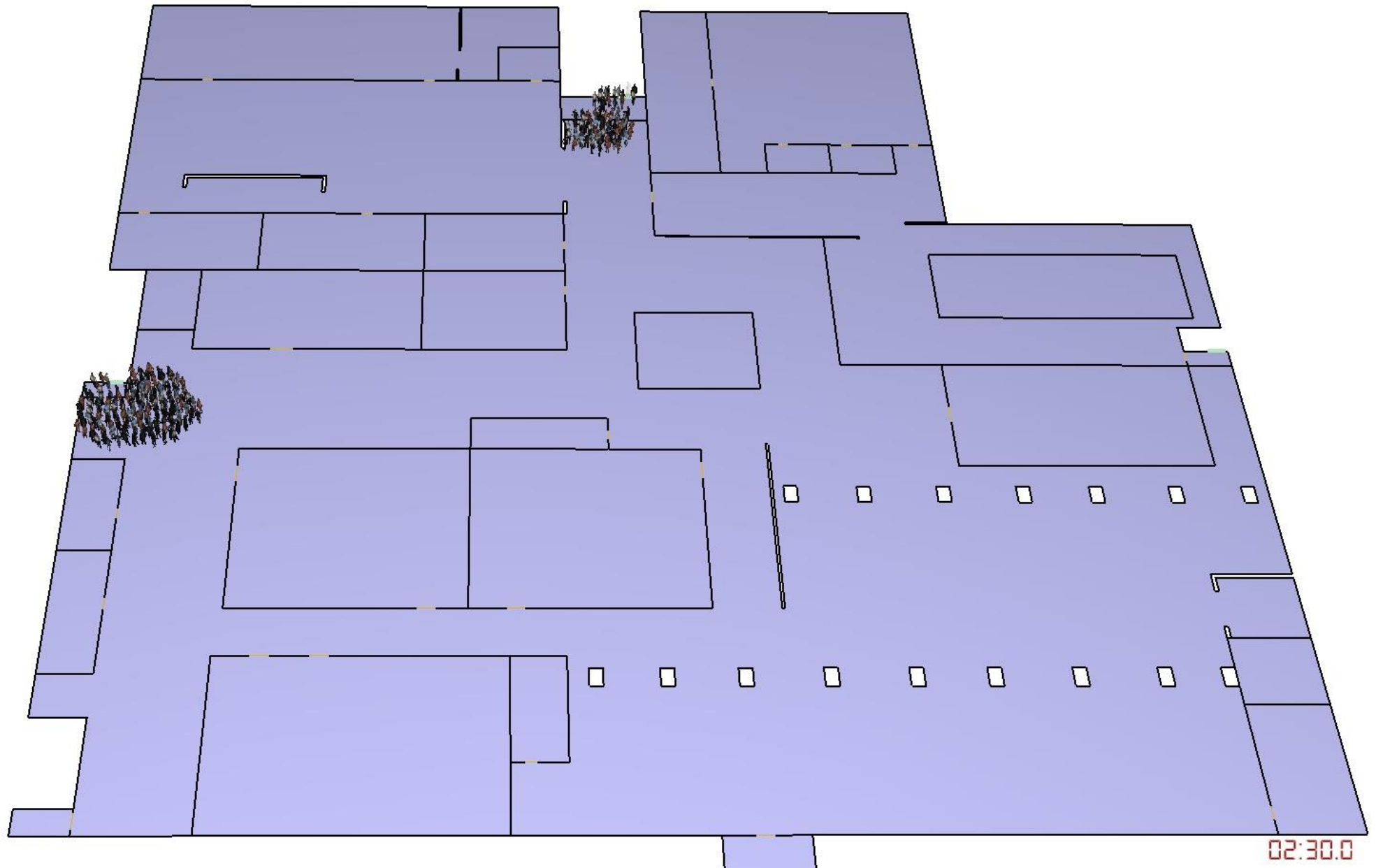


Рис. 43. Динамика движения людей на 150 секунде моделирования (Вариант 2)

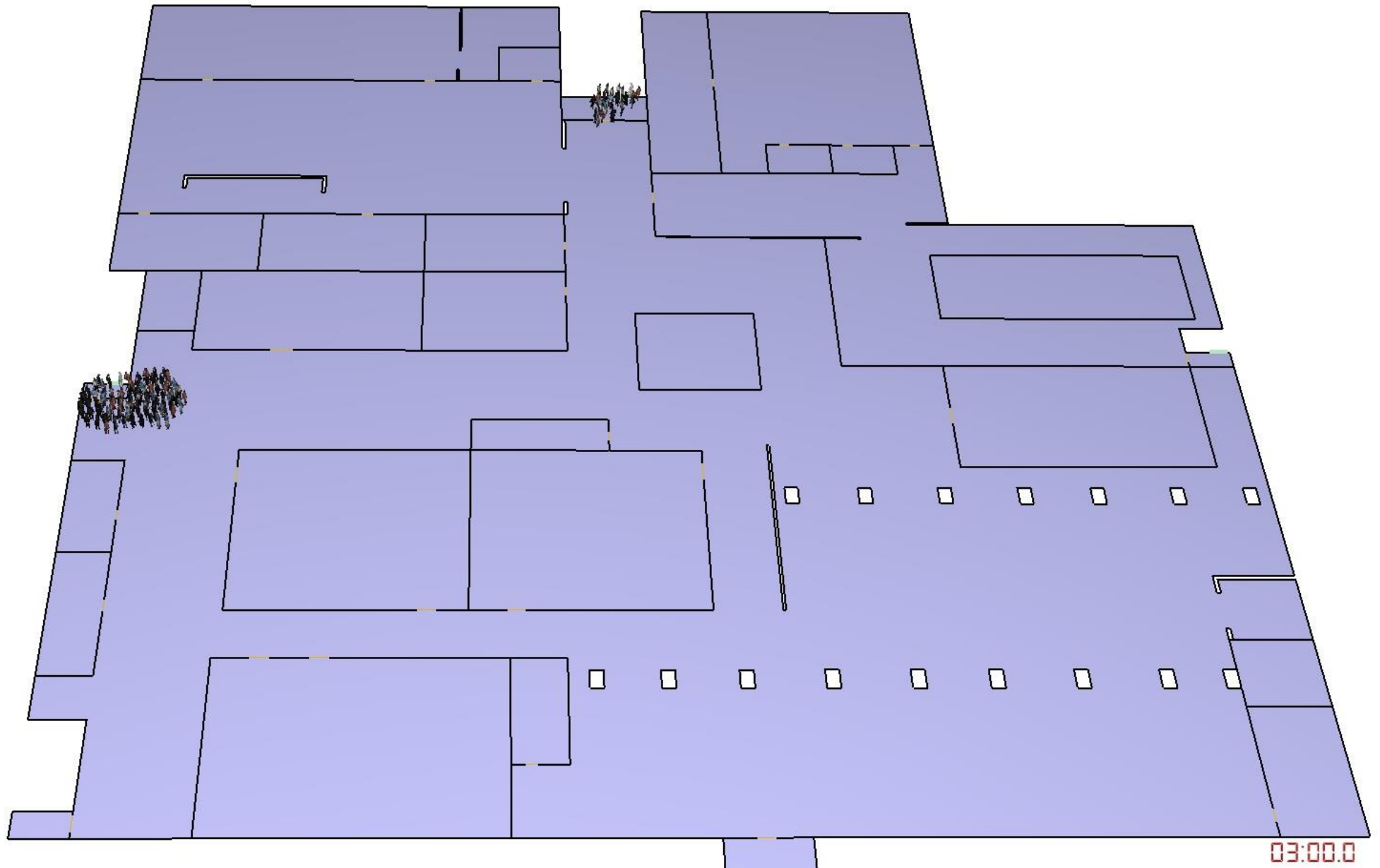


Рис. 44. Динамика движения людей на 180 секунде моделирования (Вариант 2)

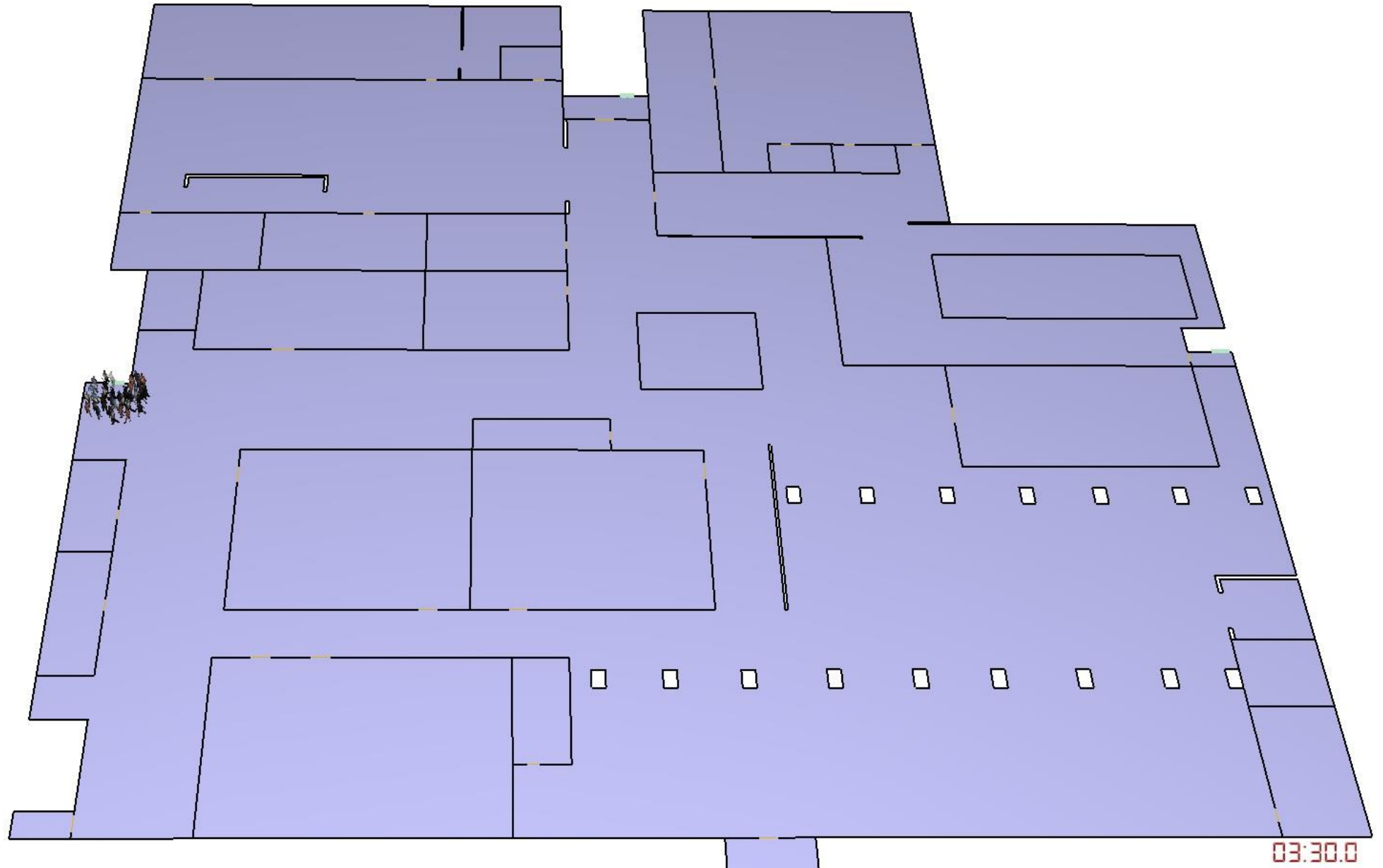


Рис. 45. Динамика движения людей на 210 секунде моделирования (Вариант 2)

ВЫВОДЫ

В результате проведенных расчетов, по имеющимся в настоящий момент данным определено, что время блокирования путей эвакуации составляет 304 с ($380 \cdot 0,8$), время эвакуации (без учета времени начала эвакуации) людей составляет:

Вариант 1 – 145 секунд;

Вариант 2 – 229 секунд.

СВОДНАЯ ТАБЛИЦА РЕЗУЛЬТАТОВ МОДЕЛИРОВАНИЯ

Пути эвакуации	Вариант эвакуации	Время блокирования, $t_{б.л}$	Необходимое время эвакуации ($t_{нб} = 0,8 t_{б.л}$), с	Расчетное время эвакуации (t_p), с	Запас по времени ($t_{нб} - t_p$), с
Пожар на 4-м этаже	1	380	304	145	159
	2	380	304	229	75

Согласно приложению №5 к Методике [15] время начала эвакуации для зданий торгового назначения, оборудованных системой оповещения и управления эвакуацией людей при пожаре (СОУЭ) III-V типа составляет 60 с.

Таким образом, в случае наличия на рассматриваемом объекте работоспособной СОУЭ, соответствующей требованиям нормативных документов, условия обеспечения безопасной эвакуации людей выполняются для рассмотренного сценария развития пожара при всех трех вариантах эвакуации.

В случае отсутствия или неисправности систем обнаружения и СОУЭ время начала эвакуации принимается равным 360 с и, соответственно, условия обеспечения безопасной эвакуации людей не выполняются.

Литература

1. Welch S, Rubini P., SOFIE, Simulations of Fires in Enclosures, User Guide, Cranfield University.- 1996
2. Launder B.E., Spalding D.B. The Numerical Computation of Turbulent Flow // *Comp. Meth. Appl. Mech. Eng.* - 1974. - N3. - pp.269-289.
3. Hossain M.S., Rodi W. A Turbulence Model for Buoyant Flows and Its Application for Vertical Buoyant Jets // “Turbulent Buoyant Jets and Plums” (Rodi W. ed.), HMT Series: Oxford, England. – 1982. - V.6. – pp.121-172.
4. Magnussen, B.F. and Hjertager, B.H. On mathematical modelling of turbulent combustion with special emphasis on soot formation and combustion // 16th Symp. (Int.) Combust. The Combustion Institute, Pittsburgh, PA. - 1976. – pp.719-729.
5. Cox G. Combustion Fundamentals of Fire. - London: Academic Press, 1995. – 476 p.
6. Lockwood, F.C. and Shah, N.G. A new radiation solution method for incorporation in general combustion prediction procedures // *18th Symp. (Int.) Combust.* The Combustion Institute, Pittsburgh, PA. – 1981. – pp.1405-1414.
7. Bressloff N.W., Moss J.B., Rubini P.A. Assessment of a Total Absorptivity Solution to the Radiative Transfer Equation as Applied in the Discrete Transfer Radiation Model // *Numerical Heat Transfer, Part B.* - 1996. - V.29. – pp.381-397.
8. Truelove J.S. HTSF DR33, AERE, Harwell, Oxon, England. 1975.
9. Карпов А.В., Макаров Д.В., Мольков В.В., Рыжов А.М. Трехмерное численное моделирование пожара в экспериментальном туннеле// *Пожаровзрывобезопасность*, 2000, т.9, №1. – 28-37.
10. Карпов А.В., Крюков А.П., Рыжов А.М. Полевое моделирование процессов тепло- и массопереноса в пламени и восходящей свободноконвективной струе// *Пожаровзрывобезопасность*, 2001, т.10, №2. – с 35-41.
11. Карпов А.В., Рыжов А.М. Полевое моделирование тепло- и массопереноса в припотолочной струе продуктов горения над нестационарными очагами пожара// *Пожаровзрывобезопасность*, 2001, т.10, №3. – с 17-24.
12. Карпов А.В., Крюков А.П., Рыжов А.М. Полевое моделирование динамики температурных полей при горении метанола в помещении большой высоты// *Пожаровзрывобезопасность*, 2001, т.10, №4. – с 15-20.
13. Волков А.В., Карпов А.В., Рыжов А.М. Математическое моделирование пожара в тоннеле с системой продольного вентилирования// «Крупные пожары: Предупреждение и тушение». Материалы XVI науч.-практ. конф.- Ч1.-ВНИИПО., Москва, 2001.-стр 7-9.

14. Ingason H. and Persson B. Prediction of optical density using CFD// Proc. of Sixth Int. Symp. on Fire Safety Science - pp.817-828.
15. Методика определения расчетных величин пожарного риска в зданиях, сооружениях и пожарных отсеках различных классов функциональной пожарной опасности. Приложение к приказу МЧС России от 30.06.2009 г. № 382 (с изменениями внесенными приказом МЧС России от 02.12.2015 г. №632).
16. «Пособие по применению «Методики определения расчетных величин пожарного риска в зданиях, сооружениях и строениях различных классов функциональной пожарной опасности». М.: ВНИИПО, 2012. 83 с.