

УДК 519.876.5, 51-77, 519.688

© *В. М. Колодкин, Б. В. Чирков*

ВАЛИДАЦИЯ МОДЕЛИ АДАПТИВНОГО УПРАВЛЕНИЯ ДВИЖЕНИЕМ ЛЮДСКИХ ПОТОКОВ В ДИНАМИЧЕСКОЙ СРЕДЕ ОГРАНИЧЕННОГО ПРОСТРАНСТВА

Работа посвящена валидации модели адаптивного управления движением людских потоков в динамической среде ограниченного пространства, в качестве которого может выступать здание. Рассматривается важный случай, при котором скорости изменения характеристик движения людского потока и состояния среды близки по величине. Для описания имманентных свойств цифровой модели здания введено понятие топологической сложности. Топологическая сложность характеризует здание с позиции связности его элементов.

Валидация основана на сопоставлении результатов эвакуации людей из зданий, полученных в процессе проведения учебных пожарных тревог, с результатами моделирования движения людских потоков. При сопоставлении сравниваются временные интервалы освобождения зданий. Экспериментальные результаты статистически значимо аппроксимируются регрессионной моделью, которая используется при валидации. Валидация позволила получить уточняющий коэффициент цифровой модели здания, при котором результаты моделирования движения людских потоков соответствуют результатам натурных наблюдений.

Валидация модели управляемого движения людских потоков в изменяющейся среде ограниченного пространства позволила использовать модель в программно-аппаратном комплексе управления людскими потоками, функционирующем в режиме опережения реального времени.

Ключевые слова: валидация модели, адаптивное управление, сложность здания, управление эвакуацией.

DOI: [10.35634/vm200309](https://doi.org/10.35634/vm200309)

Введение

Исследованиям движения людских потоков в ограниченном пространстве (в частном случае, в пространстве зданий и сооружений) посвящены многочисленные работы [1–5]. Разработаны математические модели группового движения, алгоритмы и программные комплексы. Объектом исследования в этих работах является направленное движение людей. Цель движения определяется внешними условиями и обычно связана с обеспечением безопасности жизнедеятельности. Управление людскими потоками (задание направлений движения людских потоков) предполагает прогнозирование траекторий движения, для поиска которых в ограниченном пространстве разработаны различные методы [6–8].

Необходимо отметить, что разработанные модели и программные комплексы в основном ориентированы на предварительное исследование движения людских потоков в зданиях. Результаты исследования процесса движения людей обычно представляются в виде зависимости количества людей, прошедших через выделенное сечение, от времени. По этой информации проектируются траектории движения. Тестирование моделей и программных комплексов основано либо на сопоставлении полученных данных с результатами, полученными в рамках других программных комплексов, либо на сравнении результатов с данными диаграмм зависимости скорости от плотности, описанных в работах [9–13]. Также для тестирования моделей движения людских потоков разработаны тестовые задачи [14, 15].

В предыдущих работах [16, 17] была предложена компьютерная модель управляемого движения людских потоков. Она ориентирована на моделирование движения людских потоков в ограниченном пространстве с изменяющейся средой. Целевая функция управления — минимизация ущерба для людей, оказавшихся в ограниченном пространстве при негативном воздействии среды.

Сопоставление результатов математического моделирования управляемого движения людских потоков и результатов учебных пожарных тревог выявило несоответствие характеристик эвакуации: характеристики, полученные при математическом моделировании, не соответствуют характеристикам реальных процессов эвакуации людей из зданий. В частности, различаются временные интервалы освобождения людьми зданий. Вместе с тем, необходимо учитывать, что значения параметров, фиксируемые в учебных пожарных тревогах, характеризуются неопределенностью, свойственной социотехническим системам [18], что обусловлено влиянием неконтролируемых факторов (например, человеческим фактором). Одновременно необходимо учитывать статистические закономерности, проявляющиеся при анализе экспериментальных результатов, такие как начальное количество людей в здании, характеристики зданий и т. д.

Поэтому валидация модели адаптивного управления движением людских потоков в динамической среде ограниченного пространства требует:

- (1) учета имманентных свойств пространства (здания) при моделировании движения людских потоков;
- (2) учета статистических закономерностей, проявляющихся при анализе результатов учебных пожарных тревог.

Отметим, что без контроля валидности использование модели адаптивного управления в социотехнических системах спасения людей не представляется возможным.

§ 1. Моделирование движения людских потоков в динамической среде

В данной работе рассматривается важный случай моделирования управляемого движения людских потоков в динамической среде ограниченного пространства. Случай, при котором пространственно-временные масштабы движения людского потока (масштаб «метр–секунда») и изменения состояния среды совпадают. Математические модели управляемого движения людских потоков в динамической среде, при выбранном масштабе и реализующие их методы, находят применение в ряде практических задач: управлении эвакуацией из горящего здания, управлении движением людских потоков в условиях развития террористической или химической опасности и т. д.

Совпадение пространственно-временных масштабов движения людских потоков и динамики негативных для человека изменений состояния среды накладывает дополнительные требования на управление движением: пространственно-временной масштаб управления должен отвечать масштабу изменения среды и движения. То есть при совпадении масштабов изменяющаяся среда вызывает необходимость динамического поиска путей движения и предполагает динамическое управление движением. Причем при движении людских потоков совпадение масштабов приводит, в общем случае, к необходимости поиска путей движения в режиме опережения реального времени. Опережение времени обусловлено недопущением встречного движения людских потоков и образования скоплений высокой плотности (более 5 чел/м²). В частном случае, целевая функция управления достигается при минимизации времени достижения людскими потоками заданной области по безопасным путям — T_e .

Модель и методы динамического определения путей движения людей из горящего здания находят применение в программно-аппаратном комплексе (ПАК), который в режиме опережения реального времени автоматически рассчитывает безопасные и кратчайшие по времени пути до зон безопасности и в режиме реального времени информирует людей [19].

Проектирование путей основано на результатах математического моделирования движения людских потоков в ограниченном пространстве. В рамках данной работы модель движения людских потоков базируется на связи между скоростью движения V и эмоциональным состоянием людей в потоке и его плотностью D [1], выверенной многочисленными исследованиями научной школы В. В. Холщевникова [2, 14].

Требование определения путей движения людских потоков с опережением реального времени предполагает особенности построения математической модели. В частности, модель ограниченного пространства (например, здания) представляется в виде двудольного графа $G = (W, B, R)$, в котором узлы $W \cup B = U$ относятся к двум независимым подмножествам: подмножество помещений (вершины W) и подмножество проемов (вершины B). Узлы разных подмножеств соединяются ребрами — R . Каждый узел, принадлежащий подмножеству проемов B , соединяется двумя ребрами с узлами подмножества помещений W (помещение соединяется с другим помещением только через проем). Все элементы графа характеризуются своими параметрами. Например, основные характеристики вершин графа, относящихся к помещениям, — площадь, количество человек в помещении в данный момент времени, средняя длина пути по помещению и т. д. Основная характеристика вершин графа, относящихся к проемам, — ширина.

Необходимо иметь в виду, что при построении цифровой модели здания, в случае, если линейные размеры помещений значительно различаются, помещения разбиваются на составляющие так, чтобы длина и ширина составляющих помещений были бы сопоставимы по размерам между собой. Составляющие помещений соединяются между собой проемами со своими характеристиками (например, ширина проема отвечает ширине помещения). Разбиение обусловлено требованием повышения точности расчетов времени движения людских потоков.

Множество узлов графа, относящихся к помещениям (зонам), разделены на уровни (рис. 1). К уровню 0 относится одна зона (одно фиктивное помещение), в которую входят все зоны «безопасности». Обычно это пространство вне здания и/или все зоны безопасности в здании. Номер уровня показывает минимальное количество проемов, которое отделяет помещения данного уровня от уровня 0.

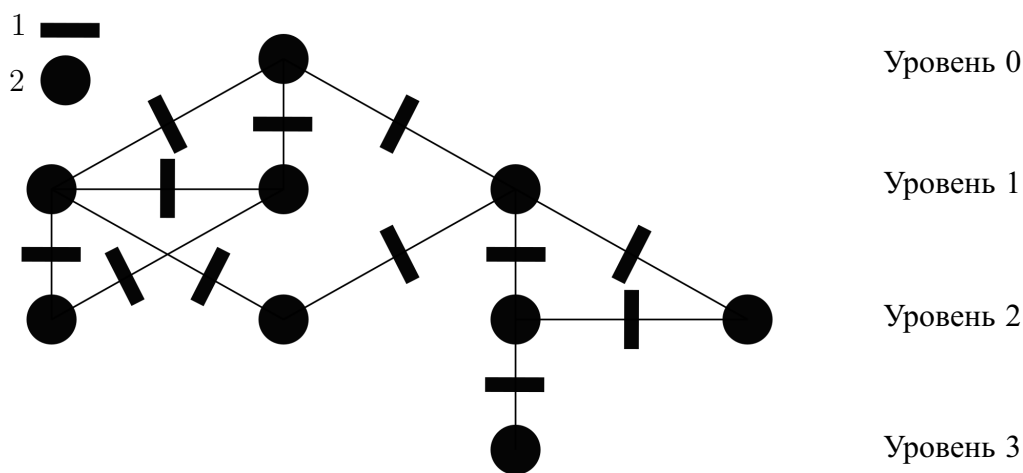


Рис. 1: Фрагмент цифровой модели здания: 1 — узлы множества B ; 2 — узлы множества W

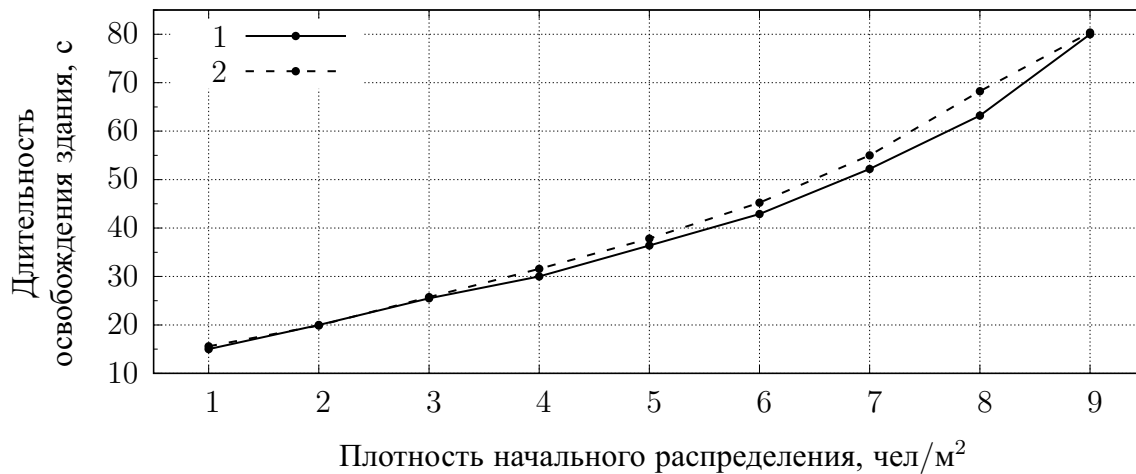


Рис. 2: Результат сравнения с тестовыми расчетами: 1 — тестовые данные; 2 — данные компьютерного моделирования

Верификация модели основана на сопоставлении результатов моделирования [17] с результатами тестовых расчетов [14]. На рис. 2 результаты моделирования движения людских потоков в здании, состоящем из одного помещения: график 1 построен по данным тестовых расчетов, график 2 — по данным результатов компьютерного моделирования. Вариативность результатов находится в пределах допустимых 10% [14], что подтверждает адекватность модели.

К аналогичным результатам приходим при моделировании людских потоков в простейших зданиях. Следовательно, различие характеристик эвакуации, полученных при моделировании и при проведении учебных пожарных тревог, связано не с моделью движения людских потоков [1–3, 16, 17], а с представлением пространственно-информационной модели здания в виде графа. В связи с этим требуется введение новой характеристики ограниченного пространства (здания), которая бы характеризовала здание с точки зрения наличия связей между его элементами.

§ 2. Количественная оценка топологической сложности зданий

Для количественной характеристики имманентных свойств здания введем понятие топологической сложности Ω . Вычислительные эксперименты по моделированию направленного движения людей [17, 19, 20] выявили, что при прочих равных условиях временной интервал до выхода последнего человека из здания по безопасным путям T_e существенно определяется имманентными свойствами здания: связностью, размерами элементов здания и т. д. Зависимость T_e от имманентных свойств здания проявляется и при анализе результатов учебных пожарных тревог. В связи с этим количественная характеристика топологической сложности Ω призвана характеризовать здание и с точки зрения связности его элементов, и с точки зрения временного интервала освобождения здания T_e .

Как было отмечено ранее, модель здания представляется в виде графа. Пути движения людей по зданию представляются подграфом. Причем траектории и скорости движения изменяются во времени в силу изменения среды в здании и характера движения людских потоков (подграф путей движения изменяется во времени). Так как топологическая сложность призвана характеризовать здание с позиций прохождения его людскими потоками, граф цифровой модели здания рассматривается как некоторый аналог информационной конструкции [21]: существуют вершины (помещения), в которых возможно изменение направления движения; существуют вершины (проемы), в которых возможно изменение скоростей

людских потоков. Проемы можно рассматривать как «узкие места» для людских потоков, в которых возможно изменение скоростей.

Учитывая, что цифровая модель здания представляется двудольным графом G , людские потоки — подграфом графа G , модель здания можно характеризовать следующими базовыми показателями:

- (а) N_w — количество вершин подмножества помещений W в модели здания (исключая вершину уровня 0);
- (б) N_b — количество вершин подмножества проемов B в модели здания;
- (в) M_w — максимальное количество вершин подмножества W одного уровня (максимальная ширина графа по подмножеству помещений);
- (г) L_w — количество уровней в графе (минимальное количество вершин подмножества помещений W при обходе графа в глубину).

Каждый показатель связан с динамикой процесса эвакуации и математической моделью поиска путей [16]. Так количество вершин подмножества помещений W в цифровой модели здания N_w определяет количество мест возможного разветвления путей. Количество вершин подмножества проемов B в цифровой модели здания N_b может влиять на динамику эвакуации из здания. Ширина графа по подмножеству помещений M_w характеризует возможность изменения траекторий людских потоков в здании и свидетельствует о существовании множества возможных путей. Количество уровней в графе L_w определяет минимальное количество помещений, которые нужно преодолеть по пути от дальнего помещения до безопасной зоны (уровень 0).

Числовые значения четырех показателей семи цифровых моделей зданий корпусов ВУЗа (P_{ij} при $i = 1, 2, 3, 4$ и $j = 1, \dots, 7$) представлены в таблице 1.

Таблица 1: Показатели цифровых моделей зданий учебных корпусов ВУЗа P_{ij} при $i = 1, 2, 3, 4$ и $j = 1, \dots, 7$

	j	N_w	N_b	M_w	L_w
i		1	2	3	4
Корпус №1	1	419	466	42	24
Корпус №2	2	352	388	32	17
Корпус №3	3	153	167	28	14
Корпус №4	4	507	536	51	26
Корпус №5	5	316	374	54	14
Корпус №6	6	390	439	41	22
Корпус №7	7	286	322	31	24
Среднее значение		346.14	384.57	39.86	20.14

Определим нормированное значение показателя H_{ij} в виде:

$$H_{ij} = \frac{P_{ij}}{\langle P_i \rangle},$$

где P_{ij} — численное значение i -го показателя j -ой модели здания; $\langle P_i \rangle$ — значение i -го показателя, усредненное по всей совокупности моделей зданий.

Таблица 2: Количественные характеристики топологической сложности зданий корпусов ВУЗа

№ корпуса	1	2	3	4	5	6	7
Ω	1.36	0.84	0.32	1.85	0.95	1.21	0.82

В качестве количественной характеристики топологической сложности для j -го здания принята величина, равная относительной площади фигуры, ограниченной точками H_{ij} на диаграмме пространства показателей H_{ij} при $i = 1, 2, 3, 4$. Если разместить точки на соответствующие оси координат, то каждая пара соседних точек вместе с точкой начала координат образует треугольник (рисунок 3). Такое расположение точек позволяет вычислить площадь образовавшейся фигуры S_j для j -ой модели здания как сумму площадей треугольников по формуле:

$$S_j = 0.5 (H_{1j} H_{2j} + H_{2j} H_{3j} + H_{3j} H_{4j} + H_{4j} H_{1j}).$$

где $j = 1, \dots, 7$ — номер здания.

Площади S_j нормируются на площадь фигуры S_0 , построенной при средних значениях $\langle P_i \rangle$. Если численное значение i -го показателя равно усредненному по всей совокупности цифровых моделей зданий, то $H_{ij} = 1$, а $S_0 = 2$. На рис. 3 представлены диаграммы пространства показателей H_{ij} при $i = 1, 2, 3, 4$.

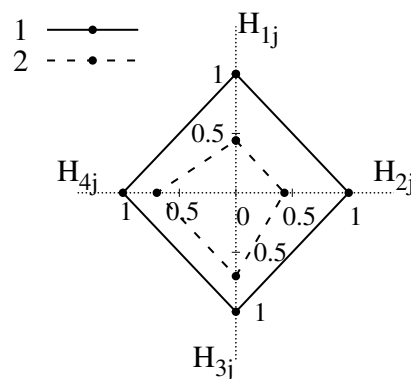


Рис. 3: Фигуры, ограниченные точками H_{ij} в пространстве показателей H_{ij} при $i = 1, 2, 3, 4$: 1 — S_0 , построенная при средних значениях $\langle P_i \rangle$; 2 — S_3 , построенная при значениях P_{ij} из таблицы 1 при $j = 3$

Для оценки топологической сложности j -го здания имеем:

$$\Omega_j = \frac{S_j}{S_0} = 0.5 S_j.$$

Результаты расчетов количественной характеристики топологической сложности зданий Ω учебных корпусов ВУЗа представлены в таблице 2.

Количественная характеристика топологической сложности здания Ω позволяет сравнить однотипные здания между собой. При анализе результатов учебных пожарных тревог топологическая сложность здания выступает в качестве независимого параметра, влияющего на временной интервал освобождения здания.

Отметим, что в настоящее время в научной литературе нет понятия топологической сложности здания. Но без количественной оценки имманентных свойств здания не представляется возможным валидация модели, а, следовательно, и создание эффективного программно-аппаратного комплекса управления людскими потоками.

§ 3. Регрессионная модель управляемого движения людских потоков

Валидация основана на сопоставлении результатов моделирования с экспериментальными результатами. По понятным причинам весьма затруднительно провести измерения характеристик управляемого движения людских потоков, например, при пожаре. Поэтому воспользуемся результатами, полученными при проведении учебных пожарных тревог в учебных корпусах ВУЗа. Анализу подлежали результаты по семи учебным корпусам, фиксируемые в течение нескольких лет.

При проведении пожарных тревог фиксировалось время выхода последнего человека T_e и количество человек N_e , вышедших из здания. Результаты представлены в таблице 3. Также в таблице для каждого эксперимента представлено среднее значение плотности людей в здании перед началом эвакуации D и топологическая сложность здания Ω .

Таблица 3: Результаты измерений: T_e — время выхода последнего человека; N_e — количество людей, вышедших из здания учебного корпуса ВУЗа; D — плотность распределения людей в здании до начала эвакуации; Ω — топологическая сложность здания

№	N_e , чел	T_e , с	D , чел/м ²	Ω	№	N_e , чел	T_e , с	D , чел/м ²	Ω
1.1	617	226	0.08	1.36	4.3	645	405	0.07	1.84
1.2	637	292	0.08	1.36	4.4	1290	459	0.14	1.84
1.3	617	225	0.08	1.36	5.1	159	247	0.05	0.95
1.4	681	299	0.09	1.36	5.2	224	159	0.07	0.95
2.1	749	233	0.10	0.84	5.3	114	293	0.03	0.95
2.2	534	267	0.07	0.84	5.4	201	121	0.06	0.95
2.3	748	331	0.10	0.84	6.1	1024	372	0.12	1.21
2.4	625	276	0.09	0.84	6.2	1325	360	0.15	1.21
3.1	180	167	0.07	0.32	6.3	710	455	0.08	1.21
3.2	110	186	0.04	0.32	6.4	849	362	0.10	1.21
3.3	100	176	0.04	0.32	7.1	303	426	0.04	0.81
3.4	175	180	0.07	0.32	7.2	335	265	0.05	0.81
4.1	1135	335	0.13	1.84	7.3	180	250	0.03	0.81
4.2	1307	435	0.15	1.84	7.4	296	262	0.04	0.81

В столбцах таблицы, помеченных символом №, первая цифра соответствует номеру здания, цифра после точки — номеру эксперимента в здании.

В первом приближении положим, что существует линейная корреляционная связь между функцией отклика системы Y , приближающей временной интервал эвакуации (временной интервал освобождения здания) и независимыми переменными: начальным значением плотности людей в здании D и его топологической сложностью Ω .

Для набора данных, отвечающих таблице 3 (число экспериментов $n = 28$, число независимых параметров $p = 2$), регрессионное уравнение, построенное методом наименьших квадратов, имеет вид $Y = 126.83 + 664.13 D + 104.81 \Omega$. Однако, как будет показано, данная регрессионная модель характеризуется неприемлемыми оценками качества параметров регрессии.

На рис. 4 представлена зависимость функции отклика системы Y от топологической сложности зданий Ω , отвечающая данным таблицы 3. Аналогичный характер носит функция отклика системы Y в зависимости от начальной плотности людей D . На графиках зависимостей $Y(D)$ и $Y(\Omega)$ некоторые точки значительно отклоняются от линий трендов. Возможно, при проведении учебных тревог в этих случаях были допущены существенные

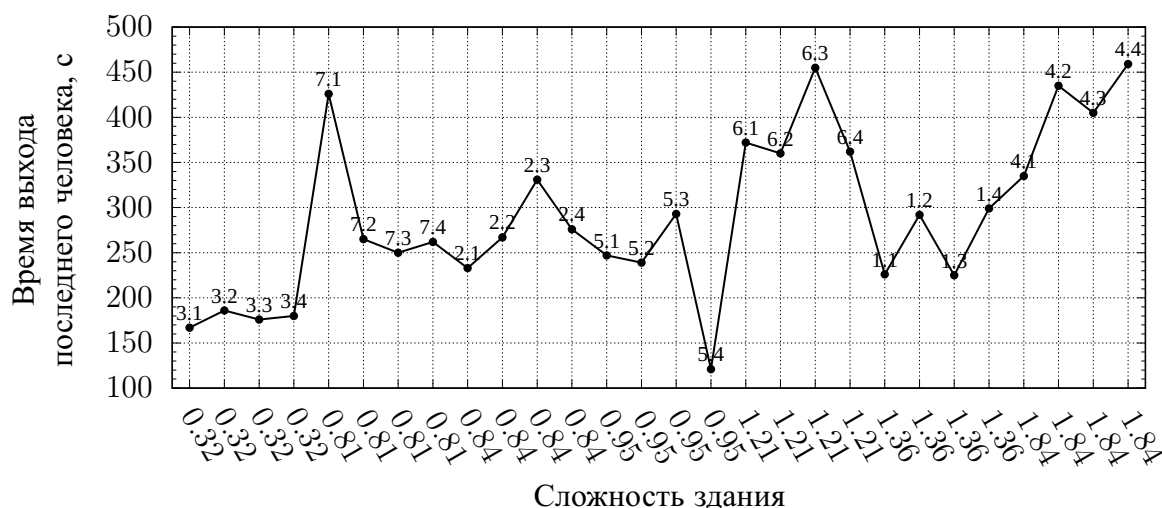


Рис. 4: Зависимость функции отклика системы Y от топологической сложности зданий Ω

ошибки при подсчете людей или времени освобождения зданий; возможно, в этих экспериментах сыграли роль неучтенные случайные факторы (человеческий фактор), что, как уже упоминалось, характерно для социотехнических систем. Например, увеличение времени эвакуации для случая 7.1 может быть обусловлено плохими погодными условиями или тем, что распределение людей по зданию способствовало образованию скоплений людей и т. д.

Исключение из рассмотрения данных, отвечающих точкам 5.4, 6.3, 7.1 (т. е. $n = 25$, $p = 2$), приводит к регрессионному уравнению:

$$Y = 115.45 + 725.76 D + 103.38 \Omega, \quad (1)$$

Регрессионная модель (1) справедлива для области:

$$0.02 \leq D \leq 0.15, \quad 0.32 \leq \Omega \leq 1.85.$$

Уравнение (1) характеризуется приемлемыми оценками качества (эффективности) параметров регрессии. Действительно, скорректированный индекс множественной детерминации

$$\bar{R}^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (T_{e_i} - Y_i)^2}{\sum_{i=1}^n (T_{e_i} - \langle T_e \rangle)^2} \left(\frac{n-1}{n-p-1} \right) = 0.66$$

показывает приемлемую для социотехнической системы оценку адекватности регрессионной модели. Для сравнения $\bar{R}^2 = 0.43$, если регрессионное уравнение отвечает данным таблицы 3 без исключения точек 5.4, 6.3, 7.1. В этом выражении T_{e_i} — время эвакуации в i -ом эксперименте, Y_i — функция отклика системы, отвечающая регрессионному уравнению (1) в i -ом эксперименте, среднее значение $\langle T_e \rangle = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n T_{e_i}$.

Корреляционная матрица представлена в таблице 4. Численные значения элементов корреляционной матрицы подтверждают корреляционную связь между функцией отклика системы Y и независимыми переменными: начальным значением плотности людей D в здании и топологической сложностью здания Ω .

Таблица 4: Корреляционная матрица

	Y	D	Ω
Y	1	0.68	0.79
D	0.68	1	0.61
Ω	0.79	0.61	1

Например, значение элемента корреляционной матрицы R_{YD} :

$$R_{YD} = \frac{\sum_{i=1}^n (Y_i - \langle Y \rangle)(D_i - \langle D \rangle)}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (Y_i - \langle Y \rangle)^2 \sum_{i=1}^n (D_i - \langle D \rangle)^2}} = 0.68,$$

где $\langle Y \rangle, \langle D \rangle$ — среднее значение функции отклика системы Y и среднее значение независимой переменной D .

Оценка значимости R_{YD} подтверждается сравнением $t = R_{YD} \frac{\sqrt{n-2}}{\sqrt{1-R_{YD}^2}}$ с критическим значением, определяемым по таблице распределения Стьюдента $t_{23;0.05}$. В данном случае $t = 4.45$; $t_{23;0.05} = 2.07$. Так как $t > t_{23;0.05}$ коэффициент корреляции R_{YD} статистически значим. Аналогично подтверждается оценка значимости $R_{Y\Omega} = 0.79$. Поскольку $t = 6.14$; $t_{23;0.05} = 2.07$, $t > t_{23;0.05}$ оценка коэффициента корреляции $R_{Y\Omega} = 0.79$ статистически значима.

По принятой классификации (шкала Чеддока), значение элемента корреляционной матрицы $R_{YD} = 0.68$, отражает среднюю силу связи между Y и D ($0.5 \leq R_{YD} \leq 0.8$). Значение элемента $R_{Y\Omega} = 0.79$ отражает высокую корреляцию между Y и Ω ($0.7 \leq R_{Y\Omega} \leq 0.9$).

Средняя ошибка аппроксимации

$$\bar{A} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left| \frac{N_{e_i} - Y_i}{N_{e_i}} \right| 100\% = 14.62\%,$$

где N_{e_i} — количество человек, вышедших из здания, в i -ом эксперименте. Для сравнения, $\bar{A} = 19.76\%$ при учете всех данных, входящих в таблицу 3.

Для систем, в которых роль случайных факторов весьма существенна, среднюю ошибку аппроксимации до 15% можно считать приемлемой [22].

Для проверки значимости уравнения регрессии (1) в целом воспользуемся F критерием Фишера. Остаточная дисперсия

$$S_{res}^2 = \frac{1}{n-p-1} \sum_{i=1}^n (T_{e_i} - Y_i)^2 = 2371.31.$$

Дисперсия

$$S_y^2 = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (T_{e_i} - \langle T_e \rangle)^2 = 6973.34.$$

Фактическое значение критерия Фишера

$$F_f = \frac{S_y^2}{S_{res}^2} = 2.95.$$



Рис. 5: Зависимость длительности освобождения здания от начальной плотности людского потока D : 1 — график, отвечающий экспериментальным данным; 2 — график отвечающий регрессионному уравнению (1)

Табличное значение критерия Фишера (F^{tab}) при уровне значимости 1% и числом степеней свободы $v_1 = n - 1 = 24$, $v_2 = n - p - 1 = 22$, $F_{(24,22,1\%)}^{tab} = 2.75$ [23].

Уравнение (1) статистически значимо описывает результаты экспериментов при выполнении условия $F_f > F_{(24,22,1\%)}^{tab}$, что имеет место в данном случае. Следовательно, выбранная гипотеза о линейной регрессионной зависимости может быть принята как правдоподобная (не противоречащая опытным данным).

На рис. 5 представлена зависимость длительности освобождения здания от начальной плотности людского потока D в здании. График 1 отвечает экспериментальным данным из таблицы 3, график 2 демонстрирует данные, отвечающие уравнению (1).

Рис. 5 наряду с количественными значениями оценок регрессионной модели иллюстрирует, что, в целом, линейная регрессионная модель удовлетворительно описывает результаты экспериментов по управляемому движению людских потоков. Этот результат важен для социотехнической системы эвакуации людей, которой свойственна стохастичность процесса. Тем самым, показана возможность использования регрессионной зависимости (1) для валидации модели управляемого движения людских потоков.

§ 4. Уточнение характеристик цифровой модели здания

Представление пространственно-информационной модели здания в виде двудольного графа — это вынужденная мера, связанная с требованием определения траекторий движения людских потоков в режиме опережения реального времени. Но именно представление модели здания в виде графа, как показано в [17], вносит определяющий вклад в результаты моделирования, если контролируется временной интервал освобождения здания по безопасным путям — T_e . В связи с этим требуется уточнение цифровой модели здания и введение некоторого коэффициента (в общем случае — функции), который бы обеспечил соответствие между экспериментальными данными — временем освобождения здания и результатами математического моделирования.

Численные эксперименты выявили, что время выхода последнего человека из здания T_m весьма существенно зависит от параметра цифровой модели — ширины внутренних проемов в здании — K . При использовании графа в качестве цифровой модели здания необходимо использовать коэффициент K , который в определенной степени компенсирует упрощения при преобразовании. То есть при определении характеристик проемов (вершин B)

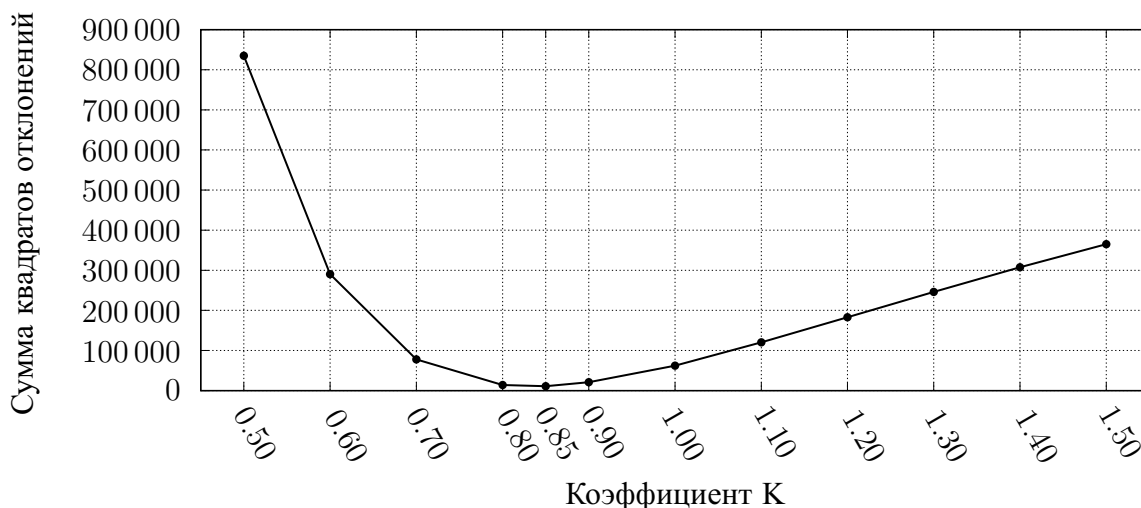


Рис. 6: Зависимость суммы квадратов отклонений по всем сценариям от коэффициента K , компенсирующего упрощение модели здания



Рис. 7: Зависимость длительности времени выхода из здания последнего человека от начальной плотности людского потока D : 1 — экспериментальные данные; 2 — данные, полученные в результате имитационного моделирования

их ширина заменяется значением коэффициента K , который предварительно вычисляется из условия $\min\{S(K)\}$, в котором $S(K)$ — сумма квадратов отклонений:

$$S(K) = \sum_{i=1}^n (Y_i - T_{m_i}(K))^2.$$

где i — номер сценария; Y_i — временной интервал освобождения здания, отвечающий регрессионному уравнению (1) для i -го сценария; T_{m_i} — длительность освобождения здания по результатам имитационного моделирования для i -го сценария.

На рис. 6 представлен график изменения суммы квадратов отклонений S по всем сценариям в зависимости от коэффициента K . Из графика следует, что минимальное значение отклонения достигается при $K = 0.85$. Это значение используется при создании цифровых моделей зданий.

На рис. 7 представлены графики длительности освобождения здания в зависимости от

начальной плотности D для рассматриваемых сценариев. График 1 отвечает экспериментальным данным из таблицы 3. График 2 отражает данные T_{m_i} , полученные путем имитационного моделирования движения людских потоков в здании при значении коэффициента $K = 0.85$.

Рис. 7 иллюстрирует степень соответствия между параметрами реального процесса и результатами имитационного моделирования управляемого движения людских потоков. В целом, результаты моделирования удовлетворительно отвечают реальному процессу, что означает валидность модели адаптивного управления движением людских потоков.

Для социотехнической системы, когда речь идет о поведении людей, невозможно учесть все действующие факторы и точно предсказать реакцию людей. В данном случае, например, на рис. 5 и 7 контролируемые характеристики для здания № 1 выпадают из общих зависимостей. Возможно, это связано с ошибками фиксации данных при проведении учебных тревог, но более вероятно, что в данном случае сказалось различие в уровнях подготовки людей к действиям в условиях учебной пожарной тревоги. Действительно, уровень подготовки контингента в учебном корпусе №1 превышает уровень подготовки контингента в других учебных корпусах.

Заключение

Валидация модели управляемого движения людских потоков в изменяющейся среде ограниченного пространства показала, что построенная модель может использоваться в программно-аппаратном комплексе управления людскими потоками, функционирующего в режиме опережения реального времени.

Выполнена оценка параметра цифровой модели здания — ширины внутренних проемов $K = 0.85$, при котором математическая модель адекватно описывает экспериментальные данные.

Модель ориентирована на использование в ПАК применительно к учебным корпусам ВУЗов. Методика валидации модели управляемого движения может быть использована для валидации модели управляемого движения людей в зданиях с изменяющейся средой иного функционального назначения с однородным контингентом.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Холщевников В.В. Людские потоки в зданиях, сооружениях и на территории их комплексов: дис. ... д-ра техн. наук / Москва. 1983. 484 с.
2. Самошин Д. А. Методологические основы нормирования безопасной эвакуации людей из зданий при пожаре: дис. ... д-ра техн. наук / Москва. 2016. 356 с.
3. Шихалев Д. В., Хабибулин Р. Ш. Математическая модель определения направлений безопасной эвакуации людей при пожаре // Пожаровзрывобезопасность. 2014. Т. 23. № 4. С. 51–60.
<https://elibrary.ru/item.asp?id=21519969>
4. Аптуков А.М., Брацун Д.А., Люшнин А.В. Моделирование поведения паникующей толпы в многоуровневом разветвленном помещении // Компьютерные исследования и моделирование. 2013. Т. 5. № 3. С. 491–508.
<https://doi.org/10.20537/2076-7633-2013-5-3-491-508>
5. Витова Т.Б. Построение и исследование клеточно-автоматной стохастической модели движения людей: дис. ... канд. тех. наук / Институт вычислительного моделирования СО РАН. Красноярск. 2017. 171 с.
6. Лю В. Методы планирования пути в среде с препятствиями (обзор) // Математика и математическое моделирование. 2018. № 1. С. 15–58.
<https://doi.org/10.24108/mathm.0118.0000098>

7. Krasuski A., Krenski K. A- evac: The evacuation simulator for stochastic environment // Fire Technology. 2019. Vol. 55. No. 5. P. 1707–1732.
<https://doi.org/10.1007/s10694-019-00827-7>
8. Ghorpade P.S., Rudrawar S.K. Review on evacuation systems for indoor fire situation // Second International Conference on Computer Networks and Communication Technologies (ICCNCT2019). Cham: Springer, 2020. P. 28–37. https://doi.org/10.1007/978-3-030-37051-0_4
9. Vanumu L.D., Ramachandra Rao K., Tiwari G. Fundamental diagrams of pedestrian flow characteristics: A review // European Transport Research Review. 2017. Vol. 9. Issue 4. Article 49.
<https://doi.org/10.1007/s12544-017-0264-6>
10. Холщевников В. В., Самошин Д. А. Эвакуация и поведение людей при пожарах: учебное пособие. М.: Академия ГПС МЧС России, 2009.
11. Шихалев Д. В. Информационно-аналитическая поддержка управления эвакуацией при пожаре в торговых центрах: дис. ... канд. тех. наук / Москва. 2015. 176 с.
12. Холщевников В. В., Парфёненко А. П. Сопоставление различных моделей движения людских потоков и результатов программно-вычислительных комплексов // Пожаровзрывобезопасность. 2015. Т. 24. № 5. С. 68–75. <https://elibrary.ru/item.asp?id=23609504>
13. Ronchi E., Kuligowski E. D., Nilsson D., Peacock R. D., Reneke P. A. Assessing the verification and validation of building fire evacuation models // Fire Technology. 2016. Vol. 52. No. 1. P. 197–219.
<https://doi.org/10.1007/s10694-014-0432-3>
14. Холщевников В. В., Самошин Д. А., Истратов Р. Н., Шаранова М. М. Тестовые задачи для проверки точности моделирования времени эвакуации людей в случае пожара: учеб.-метод. пособие. Ч. 1. М.: Академия ГПС МЧС России, 2019.
15. Юргельян Т. Б., Кирик Е. С., Круглов Д. В. О валидации модели движения людей SIGMA.CA по данным фундаментальных диаграмм // Вестник Сибирского государственного аэрокосмического университета имени академика М. Ф. Решетнева. 2010. № 5. С. 162–166.
<https://elibrary.ru/item.asp?id=16354303>
16. Колодкин В. М., Чирков Б. В., Ваштиев В. К. Модель движения людских потоков для управления эвакуацией при пожаре в здании // Вестник Удмуртского университета. Математика. Механика. Компьютерные науки. 2015. Т. 25. Вып. 3. С. 430–438.
<https://doi.org/10.20537/vm150313>
17. Колодкин В. М., Галиуллин М. Э. Программные алгоритмы, реализующие модель движения людских потоков в системе управления эвакуацией людей из здания // Пожаровзрывобезопасность. 2016. Т. 25. № 10. С. 75–85. <https://doi.org/10.18322/PVB.2016.25.10.75-85>
18. Колодкин В. М., Варламов Д. В. Особенности социотехнической системы спасения людей при пожаре в общественном здании // Технологии техносферной безопасности. 2019. № 1. С. 101–112. <https://doi.org/10.25257/TTS.2019.1.83.101-112>
19. Колодкин В. М., Чирков Б. В. Система адаптивного управления экстренной эвакуацией при пожаре в здании // Безопасность в техносфере. 2017. Т. 6. № 4. С. 58–65.
https://doi.org/10.12737/article_5a2907cc4f32d7.65348137
20. Колодкин В. М., Чирков Б. В. Снижение пожарного риска в зданиях с массовым пребыванием людей // Проблемы анализа риска. 2016. Т. 13. № 1. С. 52–59.
<https://elibrary.ru/item.asp?id=25685464>
21. Болбаков Р. Г. Сложность информационных конструкций // Образовательные ресурсы и технологии. 2016. № 4. С. 58–63. <https://doi.org/10.21777/2312-5500-2016-4-58-63>
22. Шакиров М. Т., Халявин В. П., Лешинец И. И., Тищенко В. Е. Анализ, планирование и прогнозирование себестоимости добычи нефти. М.: Недра, 1981.
23. Львовский Е. Н. Статистические методы построения эмпирических формул. М.: Высшая школа, 1988.

Колодкин Владимир Михайлович, д. т. н., профессор, кафедра общепрофессиональных дисциплин, Удмуртский государственный университет, 426034, Россия, г. Ижевск, ул. Университетская, 1.

E-mail: kolodkin@rintd.ru

Чирков Борис Владимирович, старший преподаватель, кафедра общепрофессиональных дисциплин, Удмуртский государственный университет, 426034, Россия, г. Ижевск, ул. Университетская, 1.

E-mail: b.v.chirkov@gmail.com

Цитирование: В. М. Колодкин, Б. В. Чирков. Валидация модели адаптивного управления движением людских потоков в динамической среде ограниченного пространства // Вестник Удмуртского университета. Математика. Механика. Компьютерные науки. 2020. Т. 30. Вып. 3. С. 480–496.

V.M. Kolodkin, B.V. Chirkov

Validation of the model of adaptive control of the pedestrian flow movement in a dynamic space-limited environment

Keywords: model validation, adaptive management, building complexity, evacuation management.

MSC2010: 62-07, 93A30

DOI: [10.35634/vm200309](https://doi.org/10.35634/vm200309)

The work is devoted to the validation of the model of adaptive control of the movement of pedestrian flows in a dynamic environment of limited space, which can be a building. An important case is considered in which the rates of change in the characteristics of the movement of a pedestrian flow and the state of the environment are close in magnitude. The concept of topological complexity is introduced to describe the inherent properties of a digital building model. Topological complexity characterizes the building from the position of connectedness of its elements.

Validation is based on comparing the results of the evacuation of people from buildings obtained in the course of training fire alarms with the results of modeling the movement of pedestrian flows. When comparing, the time intervals for the release of buildings are compared. The experimental results are statistically significantly approximated by the regression model, which is used in validation. Validation made it possible to obtain a refinement coefficient of the digital model of the building, in which the results of modeling the movement of pedestrian flows correspond to the results of field observations.

Validation of the model of controlled movement of pedestrian flows in a changing environment of limited space made it possible to use the model in a software and hardware complex for managing pedestrian flows, which operates in real-time advance mode.

REFERENCES

1. Kholshchevnikov V.V. *Human flows in buildings, structures and on the territory of their complexes*, Dr. Sci. (Eng.) Dissertation, Moscow, 1983, 484 p. (In Russian).
2. Samoshin D. A. *Methodological foundations of rationing the safe evacuation of people from buildings in case of fire*, Dr. Sci. (Eng.) Dissertation, Moscow, 2016, 356 p. (In Russian).
3. Shikhalev D. V., Khabibulin R. Sh. Mathematical model of definition of safe evacuation directions in case of fire, *Pozharovzryvobezopasnost'*, 2014, vol. 23, no. 4, pp. 51–60 (in Russian).
<https://elibrary.ru/item.asp?id=21519969>
4. Aptukov A. M., Bratsun D. A., Lyushnin A. V. Modeling of behavior of panicked crowd in multi-floor branched space, *Computer Research and Modeling*, 2013, vol. 5, no. 3, pp. 491–508 (in Russian).
<https://doi.org/10.20537/2076-7633-2013-5-3-491-508>
5. Vitova T. B. *Construction and study of the cellular-automaton stochastic model of human movement*, Cand. Sci. (Eng.) Dissertation, Krasnoyarsk, 2017, 171 p. (In Russian).
6. Liu W. Path planning methods in an environment with obstacles (A review), *Mathematics and Mathematical Modeling*, 2018, no. 1, pp. 15–58 (in Russian).
<https://doi.org/10.24108/mathm.0118.0000098>
7. Krasuski A., Krenski K. A-evac: The evacuation simulator for stochastic environment, *Fire Technology*, 2019, vol. 55, no. 5, pp. 1707–1732.
<https://doi.org/10.1007/s10694-019-00827-7>
8. Ghorpade P.S., Rudrawar S.K. Review on evacuation systems for indoor fire situation, *Second International Conference on Computer Networks and Communication Technologies (ICCNCT 2019)*, Cham: Springer, 2020. P. 28–37. https://doi.org/10.1007/978-3-030-37051-0_4
9. Vanumu L.D., Ramachandra Rao K., Tiwari G. Fundamental diagrams of pedestrian flow characteristics: A review, *European Transport Research Review*, 2017, vol. 9, issue 4, article 49.
<https://doi.org/10.1007/s12544-017-0264-6>

10. Kholshchevnikov V.V., Samoshin D.A. *Evakuatsiya i povedenie lyudei pri pozharakh: uchebnoe posobie* (Fire evacuation and human behavior: a training manual), Moscow: SFA of EMERCOM of Russia, 2009.
11. Shikhalev D.V. *Information and analytical support for fire evacuation management in shopping centers*, Cand. Sci. (Eng.) Dissertation, Moscow, 2015, 176 p.
12. Kholshchevnikov V.V., Parfenenko A.P. Comparison of different models of the movement of human flows and results of program computer systems, *Pozharovzryvobezopasnost'*, 2015, vol. 24, no. 5, pp. 68–75 (in Russian). <https://elibrary.ru/item.asp?id=23609504>
13. Ronchi E., Kuligowski E.D., Nilsson D., Peacock R.D., Reneke P.A. Assessing the verification and validation of building fire evacuation models, *Fire Technology*, 2016, vol. 52, no. 1, pp. 197–219. <https://doi.org/10.1007/s10694-014-0432-3>
14. Kholshchevnikov V.V., Samoshin D.A., Istratov R.N., Sharanova M.M. *Testovye zadachi dlya proverki tochnosti modelirovaniya vremeni evakuatsii lyudei v sluchae pozhara: ucheb.-metod. posobie. Chast' 1* (Test tasks for checking the accuracy of modeling the time of evacuation of people in case of fire: training manual. Part 1), Moscow: SFA of EMERCOM of Russia, 2019.
15. Yurgel'yan T.B., Kirik E.S., Krouglov D.V. On validation of SIGMA.CA model of pedestrian dynamics according to data of fundamental diagrams, *Siberian Journal of Science and Technology*, 2010, no. 5, pp. 162–166 (in Russian). <https://elibrary.ru/item.asp?id=16354303>
16. Kolodkin V.M., Chirkov B.V., Vashtiev V.K. A foot traffic model for the fire evacuation control in a building, *Vestnik Udmurtskogo Universiteta. Matematika. Mekhanika. Komp'yuternye Nauki*, 2015, vol. 25, issue 3, pp. 430–438 (in Russian). <https://doi.org/10.20537/vm150313>
17. Kolodkin V.M., Galiullin M.E. Software algorithms that implement the foot traffic model in the building evacuation management system, *Pozharovzryvobezopasnost'*, 2016, vol. 25, no. 10, pp. 75–85 (in Russian). <https://doi.org/10.18322/PVB.2016.25.10.75-85>
18. Kolodkin V.M., Varlamov D.V. Features of the sociotechnical system of saving people in case of fire in a public building, *Technology of Technosphere Safety*, 2019, vol. 83, no. 1, pp. 101–112 (in Russian). <https://doi.org/10.25257/TTS.2019.1.83.101-112>
19. Kolodkin V.M., Chirkov B.V. System for adaptive control of emergency evacuation in case of fire in a building, *Safety in Technosphere*, 2017, vol. 6, no. 4, pp. 58–65 (in Russian). https://doi.org/10.12737/article_5a2907cc4f32d7.65348137
20. Kolodkin V.M., Chirkov B.V. Reduced fire risk in buildings crowded with people, *Issues of Risk Analysis*, 2016, vol. 13, no. 1, pp. 52–59 (in Russian). <https://elibrary.ru/item.asp?id=25685464>
21. Bolbakov R.G. The complexity of information constructions, *Obrazovatel'nye Resursy i Tekhnologii*, 2016, no. 4, pp. 58–63 (in Russian). <https://doi.org/10.21777/2312-5500-2016-4-58-63>
22. Shakirov M.T., Khalyavin V.P., Leshinets I.I., Tishenko V.E. *Analiz, planirovanie i prognozirovaniye sebestoimosti dobychi nefi* (Analysis, planning and forecasting the cost of oil production), Moscow: Nedra, 1981.
23. L'vovskii E.N. *Statisticheskie metody postroeniya empiricheskikh formul* (Statistical methods to construct empirical formulas), Moscow: Vysshaya Shkola, 1988.

Kolodkin Vladimir Mikhailovich, Doctor of Engineering, Professor, Udmurt State University, ul. Universitetskaya, 1, Izhevsk, 426034, Russia.

E-mail: kolodkin@rintd.ru

Chirkov Boris Vladimirovich, Senior Lecturer, Udmurt State University, ul. Universitetskaya, 1, Izhevsk, 426034, Russia.

E-mail: b.v.chirkov@gmail.com

Citation: V.M. Kolodkin, B.V. Chirkov. Validation of the model of adaptive control of the pedestrian flow movement in a dynamic space-limited environment, *Vestnik Udmurtskogo Universiteta. Matematika. Mekhanika. Komp'yuternye Nauki*, 2020, vol. 30, issue 3, pp. 480–496.