

УДК 681.518 : 004.942

А.Н. Одейчук¹, Н.И. Адаменко², В.И. Ткаченко^{1,2}¹ *Национальный научный центр Харьковский физико-технический институт, Харьков*² *Харьковский национальный университет им. В.Н. Каразина, Харьков*

ТРЕХКОМПОНЕНТНАЯ ДВУМЕРНАЯ МОДЕЛЬ ЧЕЛОВЕКА ДЛЯ ОПИСАНИЯ ТОЛПЫ В ЭКСТРЕМАЛЬНЫХ СИТУАЦИЯХ

Впервые предложена трехкомпонентная двумерная модель человека, основанная на эллипсоподобном профиле, который в отличие от существующих однокомпонентных, более точно описывает реальный профиль человека, дает возможность имитировать движение плечевого пояса человека и, как следствие, описывать давку, когда профиль человека деформируется. Описаны силы, действующие на туловище и руки человека в соответствии с физиологическими ограничениями на подвижность конечностей верхнего плечевого пояса. Представлены уравнения, описывающие поведение человека в паникующей толпе.

Ключевые слова: математическое моделирование, модель человека, паника, толпа, экстремальная ситуация.

Введение

В настоящее время увеличение популяции, бурный рост технологий и, как следствие, увеличение пассажиропотоков все чаще приводят к образованию большого скопления людей в ограниченном пространстве в тех местах, где несколько лет назад такое событие не ожидалось, а действия образовавшейся толпы не прогнозировались.

Последние масштабные террористические атаки, произошедшие в столице Евросоюза (Брюссель) [1], а также в ведущих центрах Европы (Париж, Мадрид, Лондон и др.) [2], приведшие к значительным человеческим жертвам и разрушению инфраструктуры, а также многотысячные пересечения границ нелегальными мигрантами в Европе указывают не только на необходимость в кратчайшие сроки разработки новых эффективных методов и средств противодействия терроризму и нелегальным мигрантам, но и детального изучения поведения толпы в экстремальных ситуациях, носящих элементы паники.

Наибольшей проблемой при получении новых знаний о поведении толпы является высокая сложность проведения натуральных экспериментов и обработка полученной информации. В этой связи исследователи все чаще применяют для этих целей различные имитационные модели [3, 4].

Анализ работ, посвященных разработке моделей, описывающих поведение толпы. Обзор основных моделей паникующей толпы показал [5; 6], что в настоящее время наибольшее распространение получили: модель ADLPV, основанная на графоаналитическом методе; модели, основанные на клеточных автоматах; модели, основанные на уравнениях психофизического взаимодействия; модели,

основанные на мультиагентном подходе; модели, основанные на потенциальных скалярных полях.

Модель ADLPV, основанная на графоаналитическом методе и предполагающая разбиение всего маршрута эвакуации на типовые участки, и затем выполнение моделирования потока людей, используя табличные значения скорости передвижения людей в тех или иных условиях [7]. Ошибка моделирования составляет около 15 %. Однако данная модель не подходит для исследования гетерогенных толп, в которых разные группы людей имеют различные цели и характеристики. Кроме того, до моделирования необходимо знать маршрут, по которому будет двигаться поток людей.

В моделях, основанных на клеточных автоматах [8], пространство, по которому перемещаются агенты, представляется в виде набора клеток, образующих периодическую решетку с заданными правилами перехода. Данные правила определяют состояние клетки в следующий момент времени через состояние соседних клеток, находящихся от нее на определенном расстоянии в текущий момент времени.

К достоинствам данного подхода следует отнести простоту реализации самого клеточного автомата и несложное задание правил. Недостатком моделей, основанных на клеточном автомате, является дискретность поведения индивидов в толпе, как во времени, так и в пространстве.

В моделях, основанных на уравнениях психофизического взаимодействия [9], все социальные силы, действующие на агента в толпе, выражаются в виде физических сил, а движение агента описывается на основе законов классической механики.

Достоинствами данного подхода является возможность описывать движение людей непрерывно во времени, в отличие от клеточных автоматов.

Учитываются силы, которые действуют на людей, и имеющие некоторый психофизический смысл.

Модели, основанные на клеточных автоматах и уравнениях психофизического взаимодействия, изначально не были нацелены на описание механизмов передачи информации между людьми, обеспечение движения к какой-либо цели или же следованию некоторому плану действий.

Учет данную возможность позволяют модели, основанные на мультиагентном подходе [10], в рамках которого процесс моделирования поведения агентов описывается с помощью набора правил движения и взаимодействия отдельных агентов. Данные модели дают возможность моделировать общение между людьми в толпе, образование групп и обучение. Однако данный подход не лишен недостатков, связанных со сложностью управления взаимодействием между разными уровнями абстракции агента (делиберативный и реактивный).

В моделях, основанных на потенциальных скалярных полях [11], для каждого агента строится набор потенциальных полей, описывающих местоположение цели, к которой стремится агент, скорость передвижения, дискомфорт, который испытывает агент при передвижении.

К достоинствам данного подхода можно отнести возможность выполнять моделирование многочисленной толпы в реальном режиме времени. Недостатком является неприменимость его к моделированию толпы с большой плотностью, когда присутствует значительное трение между людьми.

В работах [5; 6] отмечается, что одним из общих недостатков современных моделей, описывающих поведение толпы, является то, что профиль горизонтальной проекции не является эллипсом, как это отмечается в исследованиях, посвященных реальным толпам. Это, в свою очередь, может приводить к искажению результатов моделирования. В особенности это проявляется при попытке моделировать толпу с высокой плотностью, в которой наблюдается давка.

Кроме того, в обзоре указывается на то, что разрабатываемые модели должны обладать возможностью моделировать гетерогенную толпу, в которой участники толпы отличаются не только скоростью, физиологическими ограничениями, целями, но и размерами.

Учитывая данные замечания, в случае, когда нет необходимости описывать коммуникацию между людьми, а также нет жестких ограничений на быстродействие, представляется достаточно актуальным развить модель, основанную на уравнениях психофизиологического взаимодействия [4; 12; 13].

В рамках данного подхода каждый i -й человек в толпе абстрактно представляется в виде верти-

кального сплошного однородного цилиндра радиусом R_i , а правила взаимодействия между людьми задаются потенциальными силами психосоциального и физического происхождения.

Рассмотрим множество из N людей, каждый из которых имеет массу m_i , где $i = \overline{1, N}$. Пусть поведение каждого индивида характеризуется радиус-вектором \vec{r}_i , актуальной скоростью передвижения \vec{V}_i и скоростью, с которой человек хотел бы передвигаться, \vec{V}_i^{want} . Именно несоответствие желаемой скорости и актуальной скорости и формирует основную силу, инициирующую движение [4]:

$$\vec{F}_i^t = m_i \frac{\vec{V}_i^{\text{want}} - \vec{V}_i}{\tau}, \quad (1)$$

где τ – параметр, характеризующий время вовлечения индивида в паникующую толпу, с.

Уравнение силы, согласно которому инициируется движение (1), устроено таким образом, что в случае превышения желаемой скорости над актуальной скоростью человек ускоряется. Если индивид не желает никуда двигаться, то его движение со временем затухает.

Помимо силы, инициирующей движение (1), на человека действуют иные силы, связанные с взаимодействием человека с другими людьми и препятствиями.

Рассмотрим силу, действующую на индивида i со стороны индивида j [4]:

$$\vec{F}_i^p = \left(A \exp \frac{D_{ij}}{B} + kH(D_{ij})D_{ij} \right) \vec{n}_{ij} + \eta H(D_{ij})D_{ij} \left((\vec{V}_j - \vec{V}_i) \vec{\tau}_{ij} \right) \tau_{ij}, \quad (2)$$

где $D_{ij} = R_i + R_j - |\vec{r}_i - \vec{r}_j|$; \vec{n}_{ij} и $\vec{\tau}_{ij}$ – нормальный и тангенциальный единичные вектора; H – функция Хэвисайда, определяющая момент возникновения взаимодействия; A , B , k , η – постоянные величины, задаваемые эмпирическим путем.

Первое слагаемое в (2) представляет собой силу, так же как и в формуле (1), психосоциальной природы. Она описывает нежелание человека вступить в слишком тесный физический контакт с другими людьми. Значение данной силы тем больше, чем ближе люди находятся между собой и, когда расстояние между индивидами становится меньше суммы их радиусов, сила отталкивания становится особенно значительной. На больших расстояниях вклад этого слагаемого достаточно слаб. Второе слагаемое в (2) описывает упругое отталкивание при лобовом столкновении между индивидами, а третье – силу трения при касательном движении. Оба взаимодействия возникают только при положитель-

ном значении D_{ij} , поэтому эти слагаемые умножаются на функцию Хэвисайда $H(D_{ij})$.

Аналогично (2) рассматривается сила взаимодействия человека с препятствием [4].

С учетом формул (1; 2) уравнения динамики паникующей толпы принимают следующий вид:

$$m_i \frac{d\vec{V}_i}{dt} = \vec{F}_i^t + \sum_{i \neq j} \vec{F}_{ij}^p + \sum_z \vec{F}_{iz}^w, \quad \frac{d\vec{r}_i}{dt} = \vec{V}_i.$$

Цель и задачи исследования. Целью данной работы является разработка трехкомпонентной двумерной модели человека, основанной на эллипсоподобном профиле проекции человека.

Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие задачи:

- описать конфигурацию трехкомпонентного профиля человека;
- задать уравнения сил, действующих на человека, описываемого трехкомпонентным профилем проекции на основе подхода психофизиологического взаимодействия между людьми.

Трехкомпонентная двумерная модель человека

В работах [5; 6], по результатам проведенного анализа, был сделан вывод, что модель, описывающую поведение толпы, следует основывать на профиле проекции человека не в виде круга, а в виде эллипса. Это позволяет имитировать ситуации, когда плотность толпы при давке достигает максимального предела $0.92 \text{ м}^2/\text{м}^2$ [14], соответствующего натурным экспериментам. При профиле проекции человека в виде круга максимальная плотность толпы составляет $0.9069 \text{ м}^2/\text{м}^2$ [15].

Однако исследования людских потоков с высокими плотностями в натуральных условиях показали, что во многих случаях, главным образом в проемах шириной до 1.2 м, плотности оказались больше $0.92 \text{ м}^2/\text{м}^2$. Максимальное значение не превышало $1.05 \text{ м}^2/\text{м}^2$ [14].

В работе [16] при проведении натуральных экспериментов установлено, что физический предел плотности потока людей, образующийся во время давки, равен $1.15 \text{ м}^2/\text{м}^2$. Однако при этом отмечается, что плотности, близкие к $1.15 \text{ м}^2/\text{м}^2$, даже тренированные люди, из которых были сформированы искусственные людские потоки, не могли выдержать продолжительное время по причине стесненного дыхания (компрессионной асфиксии).

Таким образом, однокомпонентный профиль в виде эллипса не дает возможности описывать ситуации, когда профиль человека в давке деформируется.

Кроме того, при проведении расчетов использование профиля в виде эллипса сопряжено с доста-

точно существенным усложнением вычислений при определении расстояния и коллизий между людьми и препятствиями. В этой связи предложено использовать трехкомпонентный профиль проекции человека, состоящий из трех кругов, который представлен на рис. 1.

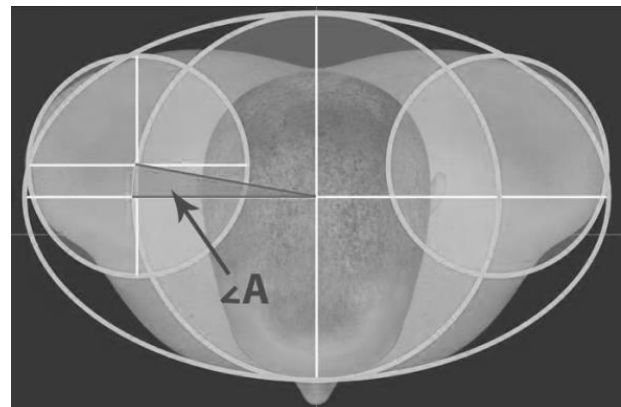
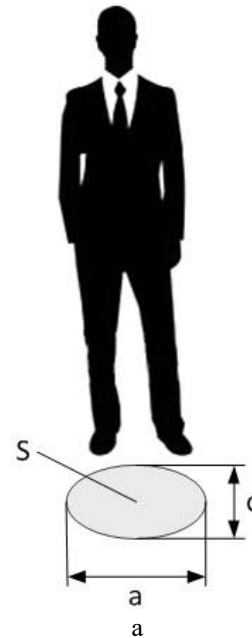


Рис. 1. Профиль проекции человека:
а – эллипс; б – трехкомпонентный

Туловище человека представляется в виде круга, диаметр которого соответствует толщине человека, и вписывается в профиль человека в виде эллипса.

Руки человека – кругами с радиусом $R^h = (a - c)/2$, где a – ширина, c – толщина человека. В виду того, что руки человека смещены ближе к спине, то круги, описывающие руки, смещены относительно горизонтальной оси проекции человека на угол A , равный 10° или $\pi/18$ радиан (см. рис. 1,б).

Такое представление профиля проекции человека позволяет значительно упростить процедуру расчета. В свою очередь, изменение местоположе-

ния рук относительно туловища дает возможность имитировать движение плечевого пояса человека и, как следствие, деформацию профиля. Учет данной особенности в модели позволяет описывать реальную давку, возникшую в толпе. При этом плотность потока людей может превышать максимальный предел и приближаться к физическому пределу [14], что не достижимо с использованием существующих моделей [5].

Кроме того, расчет сил, действующих отдельно на руки и плечевой пояс человека, позволят рассмотреть более широкий спектр травм, которые могут получить люди при давке. Силовое воздействие людей друг на друга в толпе может превышать 120 кг [7]. Практические наблюдения показывают, что оно может быть и выше. Так, например, при «давке во время эвакуации людей со стадионов в городах Глазго и Цинциннати были погнуты металлические трубчатые ограждения. Исследователи отмечают, что усилие, требуемое для изгиба металлической трубы ограждения диаметром 5 см, составляет примерно 500 килограммов» [7].

Вывих плеча составляет (50 – 60) % всех вывихов [17], а, например, прочность сухожилий составляет (40–60) МПа (около (407–611) кг/см²), а связок – 25 МПа (около 255 кг/см²) [18].

Силы, действующие на туловище человека, рассчитываются аналогичным образом, как и в исходной модели психофизиологического взаимодействия (1; 2). При этом дополнительно рассчитываются силы взаимодействия с руками других людей аналогично (2). Например, сила взаимодействия на туловище человека *i* со стороны правой руки человека *j* может быть представлена как:

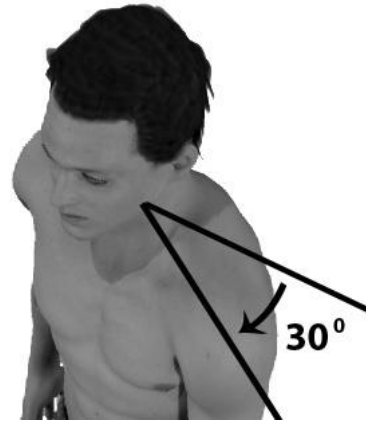
$$\vec{F}_i^{TR} = \left(A \exp \frac{D_{ij}^R}{B} + kH(D_{ij}^R)D_{ij}^R \right) \vec{n}_{ij}^{-R} + \eta H(D_{ij}^R)D_{ij}^R \left\langle \left(\vec{V}_j^R - \vec{V}_i^R \right) \vec{\tau}_{ij}^R \right\rangle \vec{\tau}_{ij}^R, \quad (3)$$

где $D_{ij}^R = R_i + R_j^R - \left| \vec{r}_i - \vec{r}_j^R \right|$; R_j^R – радиус правой руки человека *j*; \vec{r}_j^R – радиус-вектор правой руки человека *j*.

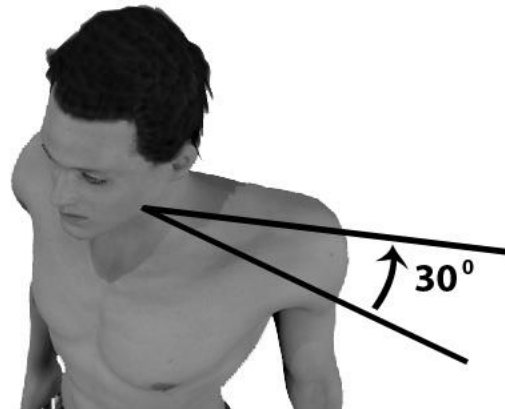
Сила \vec{F}_i^{TL} воздействия на туловище человека *i* со стороны левой руки человека *j* определяется аналогично (3). Для рук каждого человека также рассчитываются силы \vec{F}_i^{RT} , \vec{F}_i^{LT} взаимодействия с руками и туловищами всех людей, а также с препятствиями \vec{F}_{iz}^{Rw} , \vec{F}_{iz}^{Lw} по уравнениям (2; 3) с подстановкой соответствующих коэффициентов.

Также в предлагаемой модели на каждую руку $h \in \{R, L\}$ действует сила, которая направлена на

моделирование действия связок и мышц, удерживающих руку и туловище вместе и обеспечивающих возможность флексии и экстензии плеча в диапазоне от – 30° до + 30° [19] (см. рис. 2).



а



б

Рис. 2. Движение верхнего плечевого пояса в горизонтальной плоскости:
а – флексия плеча; б – экстензия плеча

Данную силу предложено задавать с помощью следующего выражения:

$$\vec{F}_i^h = \mu \cdot \left(1 + \exp \left(- \frac{|\vec{r}_i^h - \vec{r}_i|}{R/2} \right) - \exp \left(- \frac{|\vec{r}_i^h - \vec{r}_i^{Theor}|}{R^h/4} \right) \right) \cdot \vec{n}_1,$$

где $\mu = 1000$ – коэффициент, характеризующий эластичность мышц;

\vec{r}_i^h – радиус вектор текущего положения руки человека;

\vec{n}_1 – нормальный вектор от текущего положения к теоретическому положению руки;

$$\vec{r}_i^{Theor} = (x_i^{Theor}, y_i^{Theor});$$

$$x^{Theor} = r_{xi} + (x - r_{xi}) \cdot \cos(\beta) - (y - r_{yi}) \cdot \sin(\beta);$$

$$y^{\text{Theor}} = y_0 + (x - r_{xi}) \cdot \sin(\beta) + (y - r_{yi}) \cdot \cos(\beta);$$

β – угол, задающий место теоретического положения руки на окружности, моделирующей туловище, относительно направления взгляда, для правой руки равен $-\frac{5\pi}{9}$, а для левой руки $\frac{5\pi}{9}$;

$$x = r_{xi} + R_i \cdot \cos(\alpha);$$

$$y = r_{yi} + R_i \cdot \sin(\alpha);$$

$$\alpha = \begin{cases} \arctg(n_y/n_x), n_x > 0, n_y > 0 \\ \frac{3\pi}{2} + \arctg(n_x/n_y), n_x > 0, n_y < 0 \\ \pi + \arctg(n_y/n_x), n_x < 0, n_y < 0 \\ \frac{\pi}{2} + \arctg(n_x/n_y), n_x < 0, n_y > 0 \\ \frac{\pi n_y}{2}, n_x = 0 \\ \frac{\pi}{2} - \frac{\pi n_x}{2}, n_y = 0. \end{cases}$$

Таким образом, уравнения паникующей толпы примут следующий вид.

Для туловища:

$$m_i \frac{d\vec{V}_i}{dt} = \vec{F}_i^t + \sum_{i \neq j} \vec{F}_{ij}^{TT} + \sum_{i \neq j} \vec{F}_{ij}^{TR} + \sum_{i \neq j} \vec{F}_{ij}^{TL} + \sum_z \vec{F}_{iz}^w,$$

$$\frac{d\vec{r}_i}{dt} = \vec{V}_i.$$

Для руки:

$$m_i^h \frac{d\vec{V}_i^h}{dt} = \sum_{i \neq j} \vec{F}_{ij}^{hT} + \sum_{i \neq j} \vec{F}_{ij}^{hR} + \sum_{i \neq j} \vec{F}_{ij}^{hL} + \sum_z \vec{F}_{iz}^{hw} + \vec{F}_i^h,$$

$$\frac{d\vec{r}_i^h}{dt} = \vec{V}_i + \vec{V}_i^h,$$

где m_i^h – вес руки, равный 5.335 % от общего веса тела человека [20].

Выводы

Впервые предложена трехкомпонентная двумерная модель человека, основанная на эллипсоподобном профиле, который, в отличие от существующих однокомпонентных, отражает более точно реальный профиль человека, дает возможность имитировать движение плечевого пояса человека и, как следствие, описывать давку, когда профиль человека деформируется.

Трехкомпонентный профиль проекции человека, состоит из трех кругов. Туловище человека представляется в виде круга, диаметр которого соответствует толщине человека, и вписывается в профиль человека в виде эллипса. Круги, описы-

вающие руки, смещены относительно горизонтальной оси проекции человека на угол равный 10° .

Получила дальнейшее развитие модель паникующей толпы, основанная на уравнениях психофизиологического взаимодействия, за счет использования вместо профиля проекции человека в виде круга трехкомпонентного эллипсоподобного профиля, что позволяет более адекватно описывать поведение толпы при давке.

Описаны силы, действующие на туловище и руки человека в соответствии с физиологическими ограничениями на подвижность конечностей верхнего плечевого пояса.

Представлены уравнения, описывающие поведение человека в паникующей толпе.

Программная реализация предложенной имитационной модели позволит специалистам в области моделирования потоков людей и заинтересованным лицам с большей точностью и адекватностью моделировать поведение людей при террористической атаке, переходе границы нелегальных мигрантов и в других экстремальных ситуациях, а также прогнозировать развитие событий и обеспечивать своевременные адекватные действия для предотвращения негативных последствий.

Список литературы

1. Explosion at Brussels Airport took place near American Airlines desk - reports. RT International [Электронный ресурс]. – Режим доступа к ресурсу: <https://www.rt.com/news/336519-explosions-hit-brussels-airport/>. – Заголовок с экрана.
2. За последние 12 лет ударам террористов подверглись Мадрид, Лондон, Осло, Париж и Брюссель // газета «Факты и комментарии» [Электронный ресурс]. – Режим доступа к ресурсу: <http://fakty.ua/214416-zapovednie-12-let-udaram-terroristov-podverglis-madrid-london-oslo-parizh-i-bryussel>. – Заголовок с экрана.
3. Дробаха Г.А. Імітаційне моделювання дій натовпу у задачах дослідження його поведінки під час проведення масових заходів [Текст] / Г.А. Дробаха, Л.В. Розанова, В.Е. Лісцин // Збірник наукових праць Академії внутрішніх військ МВС України. – 2013. – Вип. 2 (22). – С. 31-40.
4. Helbing D. Simulating dynamical features of escape panic [Text] / D. Helbing, I. Farkas, T. Vicsek // Nature. – 2000. – Vol. 407. – P. 487-490.
5. Одейчук А.Н. Модели паникующей толпы: современный взгляд на проблему [Текст] / А.Н. Одейчук, Н.И. Адаменко, В.И. Ткаченко. – Харьков: ХГАФК, 2015. – 48 с.
6. Odeychuk A.N. Comparative analysis of models for computer calculations of crowd behavior [Text] / A.N. Odeychuk, N.I. Adamenko, V.I. Tkachenko // East European Journal of Physics. – 2015. – Vol. 2, No. 3 (2015). – P. 4-16.
7. Холщевников В.В. Эвакуация и поведение людей при пожарах [Текст] / В.В. Холщевников, Д.А. Самошин. – М.: Академия ГПС МЧС России, 2009. – 212 с.

8. Cellular automata model for evacuation process with obstacles [Text] / A. Varas, M.D. Cornejo, D. Mainemer, B. Toledo, J. Rogan, V. Munoz // *Physica A*. – 2007. – Vol. 382. – P. 631-642.
9. Богданов К.Ю. Динамика паникующей толпы [Текст] / К.Ю. Богданов // *КВАНТ*. – 2005. – № 5. – С. 2-7.
10. Wooldridge M. Introduction to MultiAgent Systems [Text] / M. Wooldridge. – John Wiley and Sons, 2002. – 365 p.
11. Hughes R.L. A continuum theory for the flow of pedestrians [Text] / R.L. Hughes // *Transportation Research*. – 2002. – Vol. 36. – P. 507-535.
12. Гребенников Р.В. Разработка индивидуальных характеристик поведения при моделировании толпы [Текст] / Р.В. Гребенников // *Вестник ВГУ. Серия: Системный анализ и информационные технологии*. – Воронеж: ВГУ, 2008. – Т.2. – С. 41-44.
13. Аптуков А.М. Моделирование поведения паникующей толпы в многоуровневом разветвленном помещении [Текст] / А.М. Аптуков, Д.А. Брацуна, А.В. Люшин // *Компьютерные исследования и моделирование*. – 2013. – Т. 5. – № 3. – С. 491-508.
14. Предтеченский В.М. Проектирование зданий с учетом организации движения людских потоков [Текст] / В.М. Предтеченский; [2-е изд.]. – М.: Стройиздат, 1979. – 375 с.
15. Слоэн Н.Дж.А. Упаковка шаров [Текст] / Н.Дж.А. Слоэн // *В мире науки*. – 1984. – № 3. – С. 72-82.
16. Копылов В.А. Исследование параметров движения людей при вынужденной эвакуации: дис. ... канд. техн. наук [Текст] / Копылов В.А. – М., 1974. – 183 с.
17. Патологическая биомеханика, вывихи и переломы [Электронный ресурс]. – Режим доступа к ресурсу: http://mirznanii.com/info/patologicheskaya-biomekhanika-vyvikhi-i-perelomu_151445. – Заголовок с экрана.
18. Биомеханика опорно-двигательного аппарата человека [Электронный ресурс]. – Режим доступа к ресурсу: http://allasamsonova.ru/?page_id=1762. – Заголовок с экрана.
19. Капанджи А.И. Верхняя конечность. Физиология суставов / А.И. Капанджи [Пер. с англ. Г. Абелева, Е. Кушневский]. – М.: Эксмо. – Т.1. – 2009. – 368 с.
20. Body Segment Data [Электронный ресурс]. – Режим доступа к ресурсу: <http://www.exrx.net/Kinesiology/Segments.html#Weights>. – Заголовок с экрана.

Поступила в редколлегию 17.11.2016

Рецензент: д-р техн. наук, ст. научн. сотр. Б.В. Борц, Национальный научный центр Харьковский физико-технический институт НАН Украины, Харьков.

ТРЬОХКОМПОНЕНТНА ДВОВИМІРНА МОДЕЛЬ ЛЮДИНИ ДЛЯ ОПИСУ НАТОВПУ В ЕКСТРЕМАЛЬНИХ СИТУАЦІЯХ

А.М. Одейчук, М.І. Адаменко, В.І. Ткаченко

Вперше запропоновано трьохкомпонентну двовимірну модель людини, засновану на еліпсоподібному профілі, яка на відміну від існуючих однокомпонентних, відображає більш точно реальний профіль людини, дає можливість імітувати рух плечового пояса людини і, як наслідок, описувати тисняву, коли профіль людини деформується. Описано сили, що діють на тулуб і руки людини відповідно до фізіологічних обмежень на рухливість кінцівок верхнього плечового пояса. Представлені рівняння описують поведінку людини в натовпі, що панікує.

Ключові слова: математичне моделювання, модель людини, паніка, натовп, екстремальна ситуація.

THE THREE-COMPONENT TWO-DIMENSIONAL MODEL OF THE HUMAN FOR DESCRIPTION OF CROWD IN THE EXTREME SITUATION

A.M. Odeychuk, M.I. Adamenko, V.I. Tkachenko

The three-component two-dimensional model of the human is for the first time offered. It based on profile similar to an ellipse which unlike the existing single-component describes a real profile of the human more precisely, makes possible to simulate the movement of the human shoulder girdle and, as a result, to describe a crush when the human profile is deformed. Forces operating on a trunk and hands according to physiological limitations for mobility of upper shoulder girdle are described. The equations describing behavior of the person in the panicking crowd are provided.

Keywords: mathematic simulation, human model, panic, crowd, extreme situation.