

## МУЛЬТИАГЕНТНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА ЭВАКУАЦИИ ПАССАЖИРОВ АВАРИЙНОГО СУДНА В ШТОРМОВЫХ УСЛОВИЯХ

М. А. БАЛАХОНЦЕВА, А. В. БУХАНОВСКИЙ

*Университет ИТМО, 197101, Санкт-Петербург, Россия*

*E-mail: avb\_mail@mail.ru*

Эвакуация пассажиров на аварийном судне зависит от множества факторов, включая характеристики окружающей среды и психологические аспекты поведения человека в экстремальных ситуациях. Разработана и реализована мультиагентная модель, которая учитывает влияние на процесс эвакуации таких факторов, как ветер, волнение и динамика судна. Предложен подход к моделированию процесса эвакуации пассажиров в штормовых условиях, основанный на силовой модели передвижения агентов, учитывающей влияние перемещений, скорости и ускорения качки. Полученные результаты позволяют оценить время эвакуации в зависимости от условий штормования (интенсивность волнения, скорость хода, курсовой угол). Представленная мультиагентная система может быть развита в части моделей, связанных с развитием затопления судна, а также с распространением пожара, задымлением, т.е. внутренними источниками аварийных ситуаций.

**Ключевые слова:** *эвакуация, имитационное моделирование, мультиагентные модели, динамика судна, аварийная остойчивость.*

Эксплуатация судов и объектов океанотехники происходит в агрессивной морской среде, что в ряде случаев приводит к катастрофическим ситуациям, угрожающим жизни и здоровью людей. Наиболее критичными с этой точки зрения являются катастрофы современных пассажирских судов [1—3], вместимость которых может достигать пяти тысяч человек [4]. Основная причина человеческих жертв — внезапность возникновения аварийной ситуации, приводящей к стремительному развитию катастрофы. Как следствие, снижению потерь должны способствовать оперативные действия экипажа по борьбе за живучесть судна и по организации экстренной эвакуации пассажиров. Вопросы эвакуации пассажиров регламентируются Международной Морской организацией (ИМО). В руководстве [5] содержатся базовые сведения по определению оптимального времени эвакуации и скорости передвижения пассажиров в зависимости от пола, возраста и геометрии пространства (лестница вверх и вниз, коридор). Однако поскольку современные пассажирские суда являются сложными инженерными объектами массового использования и существенно различаются в части организации внутреннего пространства, в общем виде процессы эвакуации пассажиров могут быть изучены только средствами компьютерного моделирования.

Задачи моделирования эффектов паники и процессов эвакуации традиционно решаются для различных зданий и сооружений с помощью соответствующего математического аппарата: от клеточных автоматов [6] до интеллектуальных агентов [7]. Существуют аналогичные решения и для морских объектов (например, система EVI [8], предназначенная для моделирования эвакуации при пожаре). Однако для морских объектов возможности их применения ограничены стационарными средствами океанотехники (например, буровыми платформами) и штилевыми характеристиками внешней среды. Поскольку катастрофы и гибель морских судов чаще всего происходят в штормовых условиях, необходимо учитывать влияние качки самого судна на процессы перемещения пассажиров.

Существующие решения в этой области (maritimeEXODUS [9] и AENEAS [10, 11]) лишь отчасти позволяют принимать во внимание влияние качки судна на процесс эвакуации. Они учитывают только кинематику перемещений судна посредством введения редуцированных коэффициентов, характеризующих скорость движения эвакуирующегося пассажира. Эти коэффициенты рассчитаны с использованием реальных данных, полученных в результате экспериментов по определению значений скорости каждого человека в толпе при статическом изменении углов крена или дифферента.

Вместе с тем практика нормирования обитаемости морских объектов и сооружений [12] показывает, что перемещение пассажиров существенно зависит не только от кинематических, но и динамических характеристик качки судна — ускорений, действующих на человека при движении в заданном направлении. Воздействие ускорения напрямую невозможно учесть, используя модели эвакуации, основанные на задании законов распределения скоростей [13]. Таким образом, требуется альтернативный подход, в котором правила движения агентов задаются на основе силовых моделей, например — модели социальных сил (Social Force) [14]. Согласно ей движение пешехода может быть описано тремя составляющими: ускорение (замедление), притяжение и отталкивание, которые являются мерами внутренней мотивации человека для совершения того или иного действия. В этой интерпретации движение пассажиров на корабле описывается в виде задачи многих тел, в которой уравнение изменения скорости  $\mathbf{v}_k$  для  $k$ -го индивидуума имеет вид:

$$m_k \frac{d\mathbf{v}_k}{dt} = \mathbf{F}_k(t) + \boldsymbol{\varepsilon}. \quad (1)$$

Здесь  $\boldsymbol{\varepsilon}$  — случайные отклонения, связанные с неоднородностью популяции,  $m_k$  — масса пассажира, а  $\mathbf{F}_k$  — результирующая сила, состоящая из следующих компонентов:

$$\begin{aligned} \mathbf{F}_k(t) = & \mathbf{F}_k^{(0)}(\mathbf{v}_k, v_k^0 \mathbf{e}_k) + \sum_j \mathbf{F}_{kj}(\mathbf{e}_k, \mathbf{r}_k - \mathbf{r}_j) + \sum_n \mathbf{F}_{kn}(\mathbf{e}_k, \mathbf{r}_k - \mathbf{r}_n^k) + \\ & + \sum_i \mathbf{F}_{ki}(\mathbf{e}_k, \mathbf{r}_k - \mathbf{r}_i, t) + \mathbf{F}_k^{(R)}(X, \dot{X}, \ddot{X}) + \mathbf{F}_k^{(S)}(X, \dot{X}, \ddot{X}). \end{aligned} \quad (2)$$

Здесь  $\mathbf{e}_k$  — направление движения пассажира (агента),  $\mathbf{F}_k^{(0)}$  — сила его собственного ускорения, зависящая от желаемого и текущего значений скорости,  $\mathbf{F}_{kj}$  — сила взаимного отталкивания (недопущения столкновений) между агентами  $k$  и  $j$ ,  $\mathbf{F}_{kn}$  — сила отталкивания между агентом и препятствием,  $\mathbf{F}_{ki}$  — сила притяжения между агентом и окружающими его объектами (другими пассажирами — члены семьи, друзья; стационарными объектами — поручни на стенах). Детализированные выражения для этих сил приведены в работе [14]. Специфическое значение имеют компоненты, зависящие от комплексов  $X, \dot{X}, \ddot{X}$  — линейных и угловых перемещений, скоростей и ускорений качки судна в различных плоскостях. Так,  $\mathbf{F}_k^{(R)}$  совокупно характеризует статические и динамические силы, влияющие на передвижение человека по поверхности переменного наклона,  $\mathbf{F}_k^{(S)}$  — силы, связанные со сменой режима движения по поверхности переменного наклона: проскальзыванием или падением. Для учета смены режима движения в  $\mathbf{F}_k^{(S)}$  включен случайный фактор, нормируемый на основе ускорений в диапазоне 3—7 м/с<sup>2</sup> в зависимости от принадлежности агента к той или иной группе (по физическим или гендерным признакам).

Уравнения (1)—(2) позволяют описать передвижения пассажиров в рамках геометрической модели судна (псевдотрехмерного непрерывного пространства, т.е. в виде набора взаимосвязанных двумерных уровней-палуб). Каждая палуба состоит из точек интереса (каюты и

выходы); навигационного графа, который связывает точки интереса; порталов для перемещений между палубами (лифты и лестницы). Можно выделить отдельные группы пассажиров по таким характеристикам, как пол, возраст, желаемая скорость передвижения, желаемый радиус зоны комфорта. Кроме того, каждому пассажиру задается желаемый пункт назначения (предпочтительный эвакуационный выход) исходя из плана эвакуации, соответствующего исходному положению индивидуума (например, занимаемой каюте). Для идентификации модели динамики пассажиров (1)—(2) использованы агрегированные данные экспериментов из работы [15], а также результаты экспериментов с движущимися платформами [16].

Ключевым аспектом применимости модели (1)—(2) является возможность получения характеристик качки судна. На морском волнении положение судна, движущегося с заданной скоростью  $V$  и курсовым углом  $\chi$  к генеральному направлению распространения волн, описывается тремя угловыми (угол дифферента  $\psi$ , крена  $\theta$ , а также угол рысканья) и тремя метрическими (продольно-горизонтальными, поперечно-горизонтальными, вертикальными  $\zeta$ ) перемещениями. В рамках настоящей работы рассматриваются угол дифферента, угол крена и вертикальное перемещение  $X = (\zeta, \Theta, \psi)$ . Такой выбор обусловлен тем, что углы  $(\Theta, \psi)$  определяют наклон плоскости, по которой движется пассажир, а ускорения вертикальной качки  $\ddot{\zeta}$  влияют на силу трения (сцепления с поверхностью) при ходьбе. Для определения этих величин используется система нелинейных уравнений [17]:

$$\begin{aligned} \ddot{\Theta} + 2\nu_{\Theta}(V)\dot{\Theta} + n_{\Theta}^2 \Theta f(\Theta)(1 + \vartheta\zeta) &= M_{W\Theta}(x, t), \\ \ddot{\zeta} + 2\nu_{\zeta}\dot{\zeta} + n_{\zeta}^2 \zeta - a_{33}V\dot{\psi} - a_{35}V\psi &= F_{W\zeta}(\chi, x, t), \\ \ddot{\psi} + 2\nu_{\psi}(V)\dot{\psi} + n_{\psi}^2(V)\psi &= M_{W\psi}(\chi, x, t). \end{aligned} \quad (3)$$

Уравнения записаны в абсолютной (не связанной с перемещением судна) системе координат. Здесь  $F_{W\zeta}(\chi, x, t)$ ,  $M_{W\psi}(\chi, x, t)$ ,  $M_{W\Theta}(\chi, x, t)$  — возмущающие сила и моменты волновой природы, зависящие от возвышения взволнованной поверхности,  $x$  — пространственная координата,  $t$  — время. Коэффициенты демпфирования  $\nu_{\zeta}, \nu_{\psi}(V), \nu_{\Theta} = \nu_1 + \nu_2(V)$ , собственные частоты  $n_{\zeta}, n_{\psi}(V), n_{\Theta}$  и коэффициенты связи  $a_{33}, a_{35}$  суть функции моментов инерции и присоединенных масс жидкости;  $\vartheta = \vartheta(S, z_p)$ , где  $S$  — площадь ватерлинии, а  $z_p = z_c - z_g$  — возвышение центра величины над центром тяжести. Функция  $f(\Theta)$  задает степень нелинейности поперечного восстанавливающего момента и выражается через его диаграмму статической остойчивости.

Система уравнений (3) описывает перемещения судна под действием возмущающей силы  $F_{W\zeta}$  и моментов  $M_{W\Theta}, M_{W\psi}$  нерегулярной природы. Они вычисляются путем прямого интегрирования по текущей смоченной поверхности судна, определяемой его положением относительно пространственно-временного поля морского волнения  $\xi(x, y, t)$ , которое воспроизводится модифицированной моделью Лонге—Хиггинса:

$$\xi(x, y, t) = \sum_n a_n \left( \cos k_n^{(x)} x + \sin k_n^{(y)} y - \omega(k_n^{(x)}, k_n^{(y)}) + \varphi_n \right). \quad (4)$$

Здесь  $k_n^{(x)}, k_n^{(y)}$  — волновые числа, связанные с частотой волнения  $\omega_n$  дисперсионным соотношением,  $a_n$  — амплитуды отдельных гармоник, вычисляемые по энергетическому спектру, а  $\varphi_n$  — случайные фазы. При этом величины  $k_n^{(x)}, k_n^{(y)}$  также обладают случайной изменчивостью внутри интервала дискретизации, что позволяет избежать периодичности моделируемого поля.

Таким образом, для решения задачи численного моделирования эвакуации пассажиров с судна в условиях сильной качки используется сочетание трех моделей. Вначале по характеристикам интенсивности волн задается частотно-направленный энергетический спектр, по которому моделируется пространственно-временное поле морского волнения (4). Затем вычисляются возмущающие силы и моменты, по которым производится интегрирование уравнений движения (3). Эти данные учитываются при вычислении сил в уравнении (2), которые, в свою очередь, используются в (1). При этом уравнения (1) и (3) интегрируются совместно. Эвакуация начинается одновременно для всех агентов, каждый из которых находится в своей точке интереса. После начала эвакуации точками интереса для агентов становятся только эвакуационные выходы, к которым они стремятся попасть за минимальное время. Общая схема моделирования приведена на рис. 1.

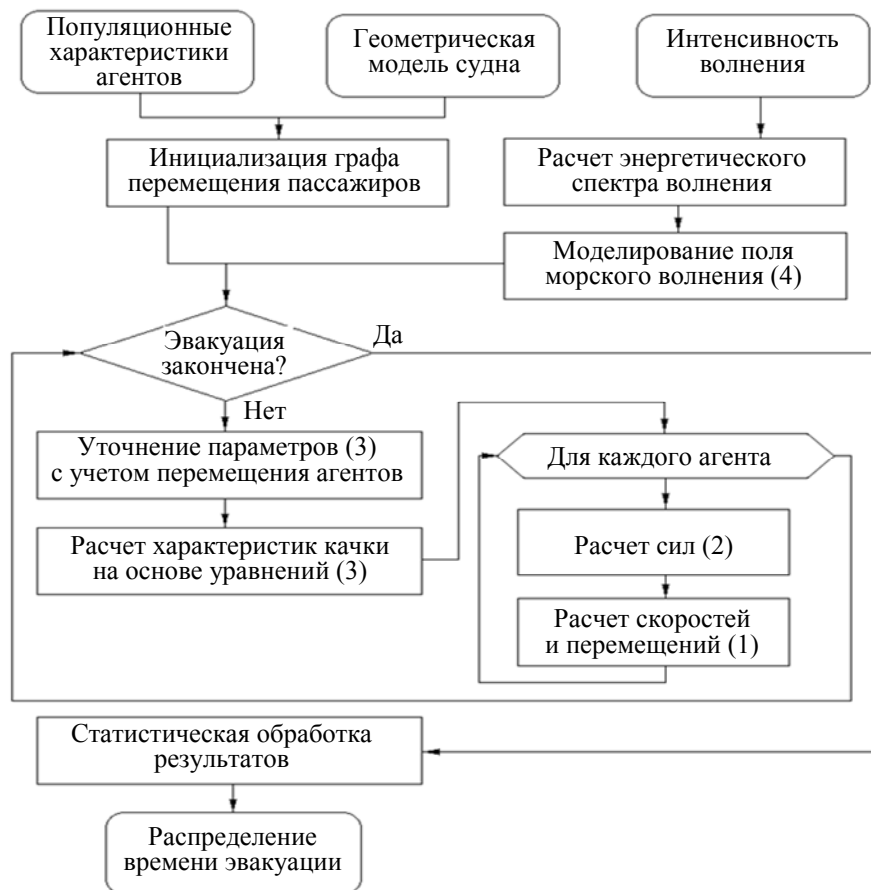


Рис. 1

В иллюстрации этого подхода рассмотрен процесс эвакуации с пассажирского судна „Коста Аллегра“ со следующими характеристиками: водоизмещение 28 597 брт, длина 187,69 м, ширина 25,75 м, осадка 8,20 м, пассажировместимость 1066 человек. Вычислительный эксперимент расчета динамики судна проводился для трех уровней интенсивности океанского волнения (5, 7, 9 баллов); судно не имело хода. При расчетах предполагалось, что курсовой угол к генеральному направлению распространения волн составляет  $30^\circ$ . Это допущение отражает условия штормования, в которых проявляется как килевая, так и бортовая качка.

На рис. 2 приведены графики ядерных оценок плотности распределения  $p(t)$  времени эвакуации пассажиров с судна при различной интенсивности волнения. Видно, что при увеличении интенсивности волнения увеличивается разброс распределения и пик смещается вправо (в сторону увеличения): в среднем время эвакуации в штормовых условиях (9 баллов) увеличивается в полтора раза. При этом видно, что по сравнению с исходным распределением на тихой воде распределения для интенсивности волнения 7 и 9 баллов становятся достаточно

близкими. Это является следствием того, что по мере усиления качки мультиагентная система выходит на определенное насыщение.

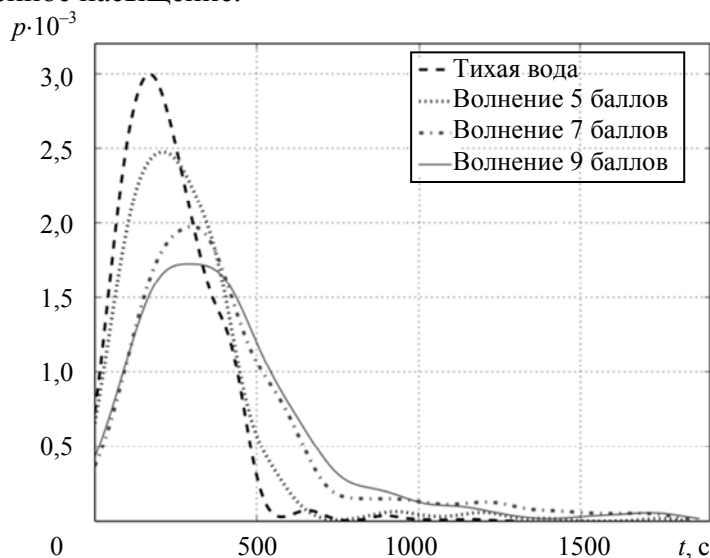


Рис. 2

Для анализа данного эффекта в таблице приведены среднеквадратичные отклонения перемещений судна вследствие вертикальной, бортовой и килевой качки, а также квантили распределения соответствующего им времени эвакуации. Из таблицы видно, что при волнении 5 баллов качка незначительно влияет на перемещения пассажиров, в основном отражаясь на снижении их собственного ускорения. Однако при волнении 7 баллов (а тем более 9 баллов) качка становится уже ощутимой; угол крена может превышать  $11^\circ$ , что соответствует „углу паники“. Как следствие, свободное движение пассажиров затруднено: им приходится держаться за поручни и двигаться только синхронно с колебаниями судна. При этом некоторые пассажиры не сразу могут выйти из своих кают и обычно эвакуируются последними, что и приводит к существенным различиям именно на хвостах распределений (99 % квантиль).

Вероятностные характеристики качки судна и времени эвакуации пассажиров

Режим качки	СКО качки судна			Квантили распределения времени эвакуации, с				
	$\zeta, \dots^\circ$	$\Theta, \dots^\circ$	$\psi, \dots^\circ$	25 %	50 %	75 %	90 %	99 %
Штиль	—	—	—	128	206	304	411	690
5 баллов	0,4	1,8	0,4	144	249	359	438	1208
7 баллов	0,9	4,8	0,8	210	342	505	715	1618
9 баллов	0,8	12,0	1,4	210	360	506	789	1689

Таким образом, в рамках исследования предложен подход к моделированию эвакуации пассажиров аварийного судна в штормовых условиях, основанный на силовой модели перемещения агентов, учитывающей влияние перемещений, скоростей и ускорений качки. Используя его, можно на основе имитационного моделирования оценить время эвакуации в зависимости от условий штормования (интенсивность волнения, скорость хода, курсовой угол). Предложенный подход может использоваться в системах поддержки принятия решений по обеспечению безопасности мореплавания [18] с целью планирования мероприятий, уменьшающих число возможных жертв как за счет внешних факторов (позиционирование судна относительно направления волн), так и внутренних (открыть или заблокировать двери, забалластировать отсеки для уменьшения крена и пр.). Предлагаемая мультиагентная система может быть развита в части моделей, связанных с:

- развитием затопления судна;
- внутренними источниками аварийных ситуаций (распространение пожара, задымление);

— процессом управления некоторыми системами (например, закрытие/открытие дверей и люков).

Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда, проект 14-21-00137.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Габрильянц В. Гибель „Адмирала Нахимова“ // Основы безопасности жизнедеятельности. 2005. № 7/8. С. 120—122.
2. Абрамов О. В. Условия и источники возникновения техногенных чрезвычайных (аварийных) ситуаций // Тр. Междунар. симп. „Надежность и качество“. 2012. Т. 1, № . С. 41—45.
3. *Costa Concordia* [Электронный ресурс]: <[http://www.costacruise.com/b2c/eu/info/concordia\\_statement.htm](http://www.costacruise.com/b2c/eu/info/concordia_statement.htm)>.
4. *Varela J. M., Rodrigues J. M., Soares C. G.* On-board decision support system for ship flooding emergency response // *Procedia Computer Science*. 2014. Vol. 29. P. 1688—1700.
5. IMO. Interim guidelines for evacuation analyses for new and existing passenger ships. MSC/Circ. 1033; 2002 [Электронный ресурс]: <[http://www.imo.org/includes/blastDataOnly.asp/data\\_id%3D5333/1033.pdf](http://www.imo.org/includes/blastDataOnly.asp/data_id%3D5333/1033.pdf)>.
6. *Pelechano N., Malkawi A.* Evacuation simulation models: Challenges in modeling high rise building evacuation with cellular automata approaches // *Automation in construction*. 2008. Vol. 17, N 4. P. 377—385.
7. *Pan X. et al.* A multi-agent based framework for the simulation of human and social behaviors during emergency evacuations // *Ai & Society*. 2007. Vol. 22, N 2. P. 113—132.
8. *Azzi C. et al.* Evacuation simulation of shipboard fire scenarios // *Fire and Evacuation Modeling Technical Conf.*, 2011 [Электронный ресурс]: <<http://www.researchgate.net/publication/253650856>>.
9. *Gwynne S. et al.* Analysing the evacuation procedures employed on a Thames passenger boat using the maritime EXODUS evacuation model // *Fire Technology*. 2003. Vol. 39, N 3. P. 225—246.
10. *Meyer-König T., Klüpfel H., Schreckenberg M.* Assessment and analysis of evacuation processes on passenger ships by microscopic simulation // *Schreckenberg and Sharma*. 2002. P. 297—302.
11. *Meyer-König T., Valanto P., Povel D.* Implementing ship motion in AENEAS—model development and first results // *Pedestrian and evacuation dynamics 2005*. Springer Berlin Heidelberg, 2007. P. 429—441.
12. *Ломов О.П. и др.* Физические факторы обитаемости кораблей и судов. СПб: Судостроение, 2014. 560 с.
13. *Van den Berg J., Lin M., Manocha D.* Reciprocal velocity obstacles for real-time multi-agent navigation // *Robotics and Automation*, 2008. ICRA 2008. IEEE Intern. Conf. 2008. P. 1928—1935.
14. *Helbing D., Molnar P.* Social force model for pedestrian dynamics // *Phys. Rev. E*. 1995. Vol. 51, N 5. P. 4282.
15. *Murphy S. Ó., Brown K. N., Sreenan C.* The EvacSim pedestrian evacuation agent model: development and validation // *Proc. of the 2013 Summer Computer Simulation Conf. Society for Modeling & Simulation International*. 2013. P. 38.
16. *Heus R., Wertheim A. H., Havenith G.* Human energy expenditure when walking on a moving platform // *European J. of Applied Physiology and Occupational Physiology*. 1998. Vol. 77, N 4. P. 388—394.
17. *Бухановский А. В., Иванов С. В., Нечаев Ю. И.* Виртуальное моделирование динамики судна на морском волнении в интеллектуальных тренажерах // *Искусственный интеллект*. 2004. Вып. 3. С. 350—359.
18. *Нечаев Ю. И.* Интеллектуальные технологии при контроле экстремальных ситуаций на основе современной теории катастроф // *Морские интеллектуальные технологии*. 2012. № 1. С. 138—147.

#### Сведения об авторах

- Марина Андреевна Балахонцева** — аспирант; Университет ИТМО; высокопроизводительных вычислений; E-mail: m.balakhontseva@gmail.com
- Александр Валерьевич Бухановский** — д-р техн. наук, профессор; Университет ИТМО; кафедра высокопроизводительных вычислений; заведующий кафедрой; E-mail: avb\_mail@mail.ru

Рекомендована кафедрой  
высокопроизводительных вычислений

Поступила в редакцию  
30.04.15 г.

**Ссылка для цитирования:** Балахонцева М. А., Бухановский А. В. Мультиагентное моделирование процесса эвакуации пассажиров аварийного судна в штормовых условиях // Изв. вузов. Приборостроение. 2015. Т. 58, № 8. С. 614—620.

## MULTIAGENT SIMULATION OF PASSENGER EVACUATION CONSIDERING SHIP MOTIONS

**M. A. Balakhontceva, A. V. Boukhanovsky**

*ITMO University, 197101, Saint Petersburg, Russia*

*E-mail: avb\_mail@mail.ru*

This paper presents a multiagent simulation of passenger evacuation in case of the inclination of a ship under the storm. Evacuation process depends on many different factors: environmental properties (such as wind velocity, intensity of waves), behavioral aspects of a human and so on. In order to describe a passenger's behavior in an evacuation situation considering the inclination of a ship, we use a force-based model adapted from multiagent system. Our approach provides an opportunity to estimate evacuation time depending on intensity of waves, rate of sailing and relative direction. Proposed model can be used in couple with ship flooding or fire propagation simulation and also it can be used in decision support systems for crew assistance.

**Keywords:** evacuation, computer simulation, passenger ship, human behavior, ship motions.

### **Data on authors**

- Marina A. Balakhontceva** — Post-Graduate Student; ITMO University; Department of High Performance Computing; E-mail: m.balakhontseva@gmail.com
- Alexander V. Boukhanovsky** — Dr. Sci., Professor; ITMO University; Department of High Performance Computing; Head of the Department; E-mail: avb\_mail@mail.ru

**Reference for citation:** Balakhontceva M. A., Boukhanovsky A. V. Multiagent simulation of passenger evacuation considering ship motions // Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedeniy. Priborostroyeniye. 2015. Vol. 58, N 8. P. 614—620 (in Russian).

DOI: 10.17586/0021-3454-2015-58-7-614-620