

*На правах рукописи*



**Балахонцева Марина Андреевна**

**МУЛЬТИАГЕНТНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ  
ПРОЦЕССОВ ЭВАКУАЦИИ С АВАРИЙНОГО СУДНА  
В ШТОРМОВЫХ УСЛОВИЯХ**

Специальность 05.13.18 – Математическое моделирование, численные методы  
и комплексы программ

**АВТОРЕФЕРАТ**

диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Санкт-Петербург – 2015

Работа выполнена в Санкт-Петербургском национальном исследовательском университете информационных технологий, механики и оптики

**Научный руководитель:** доктор технических наук,  
**Бухановский Александр Валерьевич**

**Официальные оппоненты:** **Клименко Станислав Владимирович**  
доктор физико-математических наук,  
профессор кафедры физико-технической информатики Московского физико-технического института (государственного университета)

**Петров Олег Николаевич**  
кандидат технических наук,  
доцент кафедры вычислительной техники и информационных технологий факультета кораблестроения и океанотехники Санкт-Петербургского государственного морского технического университета

**Ведущая организация:** Институт прикладной математики имени М.В. Келдыша Российской Академии Наук

Защита состоится 28 декабря 2015 г. в 15 часов на заседании диссертационного совета Д 212.227.06 при Санкт-Петербургском национальном исследовательском университете информационных технологий, механики и оптики по адресу: 197101, Санкт-Петербург, Кронверкский пр., д.49., ауд. 431.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Санкт-Петербургского национального исследовательского университета информационных технологий, механики и оптики по адресу: 197101, Санкт-Петербург, Кронверкский пр., д.49 и на сайте [frpo.ifmo.ru](http://frpo.ifmo.ru).

Автореферат разослан «17» ноября 2015 года.

Ученый секретарь диссертационного совета  
кандидат физико-математических наук, доцент

 Холодова С.Е.

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность темы** диссертационной работы обусловлена тенденциями применения методов математического моделирования для исследования сложных социотехнических систем реального мира в ситуациях, экспериментальное воспроизведение которых невозможно или ограничено (например, природные или техногенные катастрофы, угрожающие жизни и здоровью людей). Исследования в данной области выполняются в рамках научных школ С.В. Клименко, Л.В. Массель, Ю.И. Нечаева, А.С. Бугаева и др. Особый интерес представляют социотехнические системы, находящиеся в заведомо сложных условиях эксплуатации, например, современные пассажирские суда, вмещающие до 5 тыс. пассажиров. Аварийные ситуации на море возникают внезапно и развиваются стремительно; как следствие, большинство пассажиров оказывается не готово к эффективным действиям в таких условиях. При этом 72 % всех морских катастроф происходит в штормовых условиях, когда судно подвергается интенсивным ветроволновым нагрузкам нерегулярной природы, что сильно затрудняет процессы спасания на водах.

Для принятия решений по снижению рисков жизни и здоровью людей принципиально важно учитывать индивидуальные или коллективные поведенческие реакции, позволяющие человеку избежать опасности в чрезвычайной ситуации в целом и при эвакуации с аварийных объектов – в частности. Математический аппарат моделирования эвакуации со стационарных объектов и сооружений развит достаточно хорошо; на его основе реализовано разнообразное промышленное и исследовательское программное обеспечение (AENEAS, BYPASS, Evi, maritimeEXODUS и др.). Однако применение этого математического аппарата для морских пассажирских судов ограничено невозможностью учета с его помощью воздействия внешней среды, а именно качки (например, при пожаре в порту или на рейде) или наличия статических углов крена и дифферента (посадка судна на мель). Возможности обобщения аппарата на случай эвакуации с судна в штормовых условиях (реализуемые, например, KRISO, IMEX) ограничиваются средствами моделирования кинематических характеристик перемещения людей, исходя из статических наклонов палубы, в то время как в условиях сильной качки определяющее воздействие на траекторию движения человека оказывают локальные ускорения. В экстремальных условиях принципиально важно учитывать этот фактор, поскольку он приводит к потере равновесия, падениям и возможным травмам. Как следствие, решение данной задачи экстенсивным путем невозможно: требуется создание новых и развитие существующих методов математического моделирования процессов эвакуации с подвижных объектов, которые могли бы воспроизводить динамику коллективного поведения людей на поверхности переменного наклона с учетом локальных ускорений циклической природы, обусловленных нерегулярными ветроволновыми нагрузками на объект.

**Предметом исследования** являются методы, вычислительные алгоритмы и комплексы программ для имитационного моделирования процессов эвакуации.

**Целью исследования** является разработка, анализ и программная реализация метода мультиагентного (МА) моделирования, позволяющего воспроизводить процессы эвакуации с аварийного судна в штормовых условиях с учетом влияния нерегулярной качки.

**Задачи исследования:**

- оценить применимость существующих подходов к моделированию процессов эвакуации и на их основе сформулировать требования к методу МА-моделирования эвакуации с аварийного судна в штормовых условиях;
- разработать информационную модель и метод МА-моделирования движения толпы на качающейся поверхности, учитывающие физические силы, действующие на агента в условиях сильной качки (включая движение при меняющемся ускорении, падение, сохранение равновесия за счет неподвижных предметов и пр.);
- спроектировать и разработать программную среду для МА-моделирования эвакуации с качающегося судна, а также экспериментальный стенд для выполнения численных экспериментов на ее основе, функционирующий в облачной распределенной среде;
- экспериментально изучить производительность разработанного метода и его программной реализации в различных модификациях, а также провести численное исследование временных характеристик процессов эвакуации при различных условиях эксплуатации судна.

**Методы исследования** включают в себя методы дискретно-событийного моделирования, мультиагентных систем, вычислительной гидромеханики, теории графов, теории вероятностей и математической статистики, инженерии программного обеспечения.

**Научная новизна исследования** заключается в том, что впервые предложен метод МА-моделирования коллективного движения агентов на подвижной поверхности, который позволяет учитывать не только наклоны, но и локальные ускорения, действующие на агентов. Это дало возможность разработать новый метод имитационного моделирования процессов эвакуации с аварийного судна в штормовых условиях, учитывающий эффекты движения толпы, обусловленные способностью человека сохранять равновесие в условиях сильной качки.

**Практическую значимость** определяет:

- программное обеспечение МА-моделирования процессов эвакуации с аварийного судна, которое может использоваться в составе современных систем исследовательского проектирования морских объектов и сооружений, а также в бортовых системах обеспечения безопасности мореплавания крупных пассажирских судов;

- экспериментальный стенд на основе платформы CLAVIRE, функционирующий в распределенной среде, предоставляющей доступ к результатам моделирования в форме облачных сервисов, и применимый в составе тренажерных систем и виртуальных лабораторий.

**На защиту выносятся**

- Метод математического моделирования коллективного движения агентов на качающейся поверхности на основе совмещения феноменологического механизма социальных сил ( $SF^1$ , social force) и физических сил (локальных ускорений), действующих на агента в условиях сильной качки.
- Метод имитационного моделирования эвакуации с аварийного судна в штормовых условиях, учитывающий эффекты потери агентами равновесия, столкновения с препятствиями и другими агентами при циклически меняющихся наклонах палубы и локальных ускорениях, обусловленных ветроволновыми нагрузками нерегулярной природы.

**Достоверность научных результатов и выводов** обусловлена корректным применением математического аппарата при выводе основных уравнений метода, адекватной процедурой идентификации параметров модели на основе обобщенных экспериментальных данных, а также непротиворечивостью результатов численных экспериментов документально зарегистрированным особенностям процессов эвакуации с аварийных судов в штормовых условиях.

**Внедрение результатов работы.** Результаты работы использованы при выполнении проектов «Распределенные экстренные вычисления для поддержки принятия решений в критических ситуациях», дог. № 11.G34.31.0019 от 02.12.2010 г. с дополнительным соглашением № 02 от 01.03.2013 г.; «Создание высокотехнологичного производства комплексных решений в области предметно-ориентированных облачных вычислений для нужд науки, промышленности, бизнеса и социальной сферы», дог. № 21057 от 15.07.2010 г.; «Предсказательное моделирование экстремальных явлений и оценка рисков устойчивого развития сложных систем», дог. № 713581 от 10.09.2013 г.; «Облачные технологии высокопроизводительных вычислений в задачах интерактивной 3D-визуализации сложных процессов и систем», соглашение № 14.V37.21.0178 от 20.07.2012 г.; «Суперкомпьютерное моделирование критических явлений в сложных социальных системах», соглашение № 14-21-00137 от 15.08.2014 г.

**Апробация работы.** Полученные результаты обсуждались на шести международных и всероссийских научных конференциях, семинарах и совещаниях, включая Школу суперкомпьютерных вычислений Санкт-Петербургского национального исследовательского университета информационных технологий, механики и оптики (Санкт-Петербург, 2012), XVIII Байкальскую Всероссийскую конференцию "Информационные и математи-

---

<sup>1</sup> Термин введен D. Helbing в 1995 г.

ческие технологии в науке и управлении" (Иркутск, 2013), 14th GeoConference on Informatics SGEM (Варна, Болгария, 2014), Международную конференцию "International Joint Conference SOCO'14-CISIS'14-ICEUTE'14" (Бильбао, Испания, 2014), Международную научно-практическую конференцию молодых ученых и специалистов "4th International Young Scientists Conference" (Афины, Греция, 2015).

**Публикации.** По материалам диссертации опубликовано 5 печатных работ, в том числе 4 статьи – в изданиях, индексируемых ВАК, WoS, SCOPUS.

**Личный вклад автора** в работах, выполненных в соавторстве, заключается в детализации постановки задачи моделирования процессов эвакуации с учетом динамических условий изменения среды; адаптации модели на основе SF к специфике учета качки судна; выводе основных уравнений метода и исследовании процессов, учитывающих влияние локальных ускорений на динамику агентов; разработке метода идентификации модели на основе обобщенных экспериментальных данных; разработке программной среды моделирования движения агентов; создании экспериментального стенда для выполнения вычислительных экспериментов на основе разработанного и заимствованного прикладного программного обеспечения; проведении и интерпретации численных экспериментов, демонстрирующих применимость предложенного метода моделирования; разработке предложений по дальнейшему использованию результатов работы.

**Структура и объем работы.** Диссертационная работа состоит из введения, четырех глав, заключения и списка литературы (100 источников). Работа содержит 109 страниц текста, включая 35 рисунков и 9 таблиц.

## СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

**Во введении** обоснована актуальность исследуемой проблемы, сформулированы задачи исследования, описаны положения, определяющие научную новизну и практическую значимость работы.

**Первая глава** посвящена аналитическому обзору предметной области и формулировке требований к методу моделирования эвакуации с аварийного судна. По объему ущерба жизни и здоровью людей на море первое место, как правило, занимают пассажирские суда. Примером могут стать катастрофы лайнеров «Титаник», «Андреа Дориа», парохода «Адмирал Нахимов», паромов «Хевелиуш», «Эстония» и многих других. В последние несколько десятилетий в связи с растущей популярностью пассажирских круизных линий данная проблема становится все более актуальной: ежегодно во всем мире около 10 млн людей путешествуют более чем на 230 круизных судах. Как следствие, это требует решения трех задач обеспечения безопасности на море: (а) не допустить наступления опасной (аварийной) ситуации; (б) предотвратить развитие аварийной ситуации; (в) минимизировать ущерб жизни и здоровью людей при неконтролируемом развитии аварийной ситуации. К последней группе задач относится организация своевременной и безопасной эвакуации с аварийного судна. Несмотря на то что этот вопрос в самом общем виде регламентируется Международной Морской организацией (ИМО)<sup>2</sup>, процессы эвакуации с конкретного судна могут быть изучены только средствами компьютерного моделирования.

В диссертации рассмотрены различные подходы к математическому моделированию процессов эвакуации: на основе гидродинамической аналогии, конечных автоматов и интеллектуальных агентов, описывающих движение людей в толпе на индивидуальном уровне детализации. В настоящее время аппарат МА-моделирования движения толп людей, в том числе в экстремальных условиях достаточно хорошо развит для стационарных объектов и сооружений. Для этого используются как кинематические (RVO), так и динамические (SF) методы моделирования движения агентов. Однако основным условием использования таких методов является предположение о стационарности среды, в которой происходит движение. Адаптация методов для моделирования процесса эвакуации с динамических объектов (таких, как качающееся судно), является отдельной задачей.

В табл. 1 приведены сравнительные характеристики методов моделирования эвакуации с аварийного судна (и реализующего их ПО), использующих МА-подход. Видно, что только одно решение (IMEX) учитывает влияние качки, интерпретируя ее при этом как медленный процесс. Это выражается в том, что в поведении агента учитывается угол наклона палубы как статический крен и не принимаются в расчет действующие на него локальные

---

<sup>2</sup> 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)>.

ускорения. Данный факт ограничивает возможность применения существующих методов в условиях сильной качки, когда движение по судну затруднено опасностью потери равновесия, столкновения с неподвижными объектами или другими агентами.

**Таблица 1 – Сравнительный анализ программных решений для моделирования эвакуации с аварийного судна**

Критерий	Программное решение			
	IMEX	EVAC	Evi	Maritime EXODUS
Модель агента	Динамическая	Динамическая	Кинематическая	Кинематическая
Модель толпы	-	Social Force	Групповая скорость	-
Пространство	Непрерывное	Непрерывное	Непрерывное	Дискретное
Поворот агента	Нет	Есть	Нет	Нет
Наклон палубы	Регулярная качка	Нет	Статический угол наклона	Статический угол наклона
Метод учета наклона палубы	Проекция силы тяжести	–	Редукционный коэффициент	Редукционный коэффициент

В целом на основе проведенного анализа можно сделать выводы об актуальности общей постановки задачи моделирования эвакуации с аварийного судна в следующей форме:

- процесс эвакуации описывается МА-моделью на индивидуальном уровне, учитывающем не только физиологические, но и психологические характеристики агентов, влияющие на их поведение при эвакуации;
- при моделировании движения агентов учитывается влияние на их траекторию не только углов качки, но и возникающих при этом локальных ускорений;
- учитывается качка судна в самой общей постановке (шесть степеней свободы, нерегулярность внешних ветроволновых воздействий), что позволяет наиболее адекватно воспроизвести реальные условия.

Такая постановка задачи моделирования эвакуации агентов с учетом влияния ускорений качки является принципиально новой. Математический аппарат, позволяющий выполнить такое моделирование, по-видимому, отсутствует, что и определило целесообразность проведения исследований в данной области.

Во **второй главе** сформулирован метод моделирования процесса эвакуации с аварийного судна, находящегося в штормовых условиях под воздействием ветра и волнения. Метод основывается на численном воспроизведении трех взаимосвязанных явлений:

- стохастические изменения внешней среды (ветер и морское волнение), действующей на судно;
- нерегулярные колебания судна под воздействием ветроволновых нагрузок;





В модели возможны следующие варианты маршрутов, воспроизводящих поведение людей при эвакуации: априорный выбор маршрута согласно плану эвакуации (активные и пассивные пассажиры); выбор кратчайшего маршрута по собственным предпочтениям (активные пассажиры); следование за лидером или нахождение в каюте в отсутствие лидера (пассивные пассажиры); неконтролируемые перемещения (пассажиры, впадающие в панику). При этом все агенты обладают вестибулярными сенсорами, которые позволяют во время движения по маршруту инициировать реакцию на циклические изменения угловых перемещений, скоростей и ускорений: замедление движения при подъемах и резких спусках; тяготение к локальным точкам интереса (например, возможность схватиться за поручень); коррекция ускорений собственного движения с учетом внешних воздействий. Дополнительно в рассмотрение вводятся исполнительные механизмы, реализующие выбывание агента из процесса эвакуации (его гибель или неспособность двигаться самостоятельно) вследствие падения или столкновения с препятствиями.

Для моделирования движения агентов по качающемуся судну предложен комбинированный метод, сочетающий положительные черты SF и прямой учет препятствий в RVO. Движение агентов описывается в виде задачи многих тел, в которой изменение скорости  $\vec{v}_k$   $k$ -го индивидуума с унифицированной единичной массой задается уравнением:

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

Здесь  $\vec{\varepsilon}$  – случайные отклонения, связанные с неоднородностью популяции, а  $\vec{F}_k$  – результирующая сила:

$$\vec{F}_k(t) = \vec{F}_k^{(0)}(\vec{v}_k, v_k^0 \vec{e}_k) + \sum_j \vec{F}_{kj}(\vec{e}_k, \vec{r}_k - \vec{r}_j) + \sum_n \vec{F}_{kn}(\vec{e}_k, \vec{r}_k - \vec{r}_n^k) + \sum_i \vec{F}_{ki}(\vec{e}_k, \vec{r}_k - \vec{r}_i, t) + \frac{\vartheta}{D} [\vec{F}_k^{(R)}(\mathbf{x}, \dot{\mathbf{x}}, \ddot{\mathbf{x}}) + \vec{F}_k^{(S)}(\mathbf{x}, \dot{\mathbf{x}}, \ddot{\mathbf{x}})]. \quad (2)$$

Здесь  $\vec{e}_k$  – направление движения агента,  $\vec{F}_k^{(0)}$  – сила его собственного ускорения,  $\vec{F}_{kj}$  – сила взаимного отталкивания (недопущения столкновений) между агентами  $k$  и  $j$ ,  $\vec{F}_{kn}$  – сила отталкивания между агентом  $k$  и препятствием  $n$ ,  $\vec{F}_{ki}$  – сила притяжения между агентом и окружающими его объектами (другие пассажиры – члены семьи, друзья; стационарные объекты – поручни или леера на стенах). Для учета влияния качки дополнительно введены члены (выраженные аналитически), зависящие от комплексов  $\mathbf{X}, \dot{\mathbf{X}}, \ddot{\mathbf{X}}$  – линейных и угловых перемещений, скоростей и ускорений качки судна в различных плоскостях. Так,  $\vec{F}_k^{(R)}$  совокупно характеризует статические и динамические силы, влияющие на передвижение человека по поверхности переменного наклона,  $\vec{F}_k^{(S)}$  – силы, связанные со сменой режима движения по поверхности переменного наклона: проскальзыванием или падением. Безразмерный коэффициент  $\vartheta/D$  ( $D$  – водоизмещение судна) необходим для нормировки при при-

ведении физических сил, действующих на агента как материальное тело, к безразмерным социальным силам.

В зависимости от постановки задачи рассмотрена возможность использования трех моделей качки судна для получения комплексов  $X, \dot{X}, \ddot{X}$ :

- линейная спектральная модель динамики судна на нерегулярном волнении;
- нелинейная модель параметрически связанных колебаний судна на нерегулярном волнении;
- полная имитационная модель колебаний судна на нерегулярном волнении.

Линейная спектральная модель с вычислительной точки зрения является наиболее эффективной, однако она может быть использована лишь для воспроизведения сильной качки в зоне основного резонанса. Для описания параметрических резонансов, характерных для крупных судов, целесообразно использовать нелинейную модель параметрически связанных колебаний, а для воспроизведения эффектов, связанных с развитием аварийной ситуации, а также с изменением характеристик остойчивости судна, обусловленным движением агентов – полную имитационную модель. Входными данными всех трех моделей являются характеристики морского волнения в спектральной форме. Для их задания используется проект JONSWAP в виде аппроксимации по набору параметров, зависящих от интенсивности волнения.

Идентификация модели движения агентов (1)–(2) включает в себя: (а) определение SF-коэффициентов модели движения агентов по палубам судна в условиях отсутствия качки; (б) оценку калибровочного коэффициента  $\vartheta$ , необходимого для приведения физических сил, действующих на агента, к социальным. Эти операции могут быть разделены, поскольку для нахождения  $\vartheta$  достаточно изучить движение только одного агента в условиях качки. В работе предложен метод идентификации, основанный на понятии эквивалентных углов качки, позволяющих применить для определения калибровочного коэффициента данные экспериментов, полученных при статическом крене и дифференте, и обобщенные в виде редуцированных коэффициентов. Эквивалентные углы рассчитываются через силу, которую агенту необходимо приложить для подъема или спуска с учетом статического угла и локальных ускорений. Сам коэффициент  $\vartheta$  определяется численной оптимизацией по квадратичной функции различий между данными измерений статических углов и результатами моделирования относительно динамических (суммы статического и эквивалентного) углов. Результат сопоставления редуцированных коэффициентов, полученных в ходе моделирования по (1)–(2) для динамических углов и обобщенных экспериментов<sup>4</sup>, приведен на рис. 2.

Таким образом, описанный метод моделирования позволяет одновременно учитывать как коллективное движение агентов, так и воздействие на

<sup>4</sup> Weidmann U. Transporttechnik der Fußgänger: transporttechnische Eigenschaften des Fußgängerverkehrs, Literaturauswertung, 1992.

него локальных наклонов палубы и локальных ускорений. При этом наличие в (1)–(2) членов, связанных с локальными ускорениями, позволяет воспроизводить ситуации прямых столкновений агентов друг с другом или с препятствиями (т.е. из-за качки агенты не могут удержаться на выбранной траектории), что позволяет оценивать также степень опасности процесса эвакуации в различных режимах для жизни и здоровья людей.

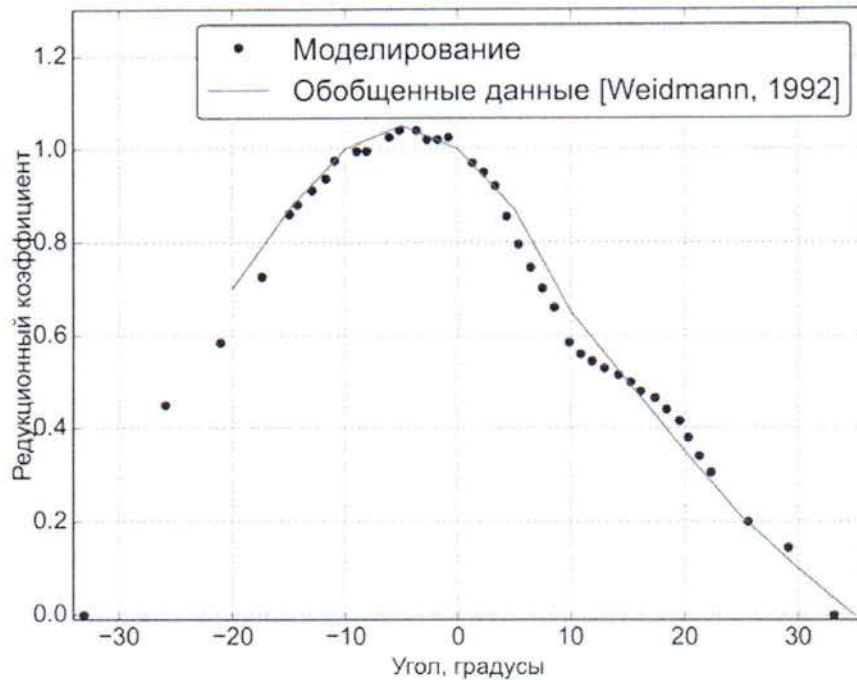


Рисунок 2 – Сопоставление редуционных коэффициентов, полученных на основе моделирования и обобщенного эксперимента

В **третьей главе** в виде комплекса программ рассмотрена численная реализация метода имитационного моделирования процесса эвакуации с аварийного судна в штормовых условиях. На рис. 3 представлен обобщенный алгоритм метода Монте-Карло для получения расчетных значений временных характеристик процесса эвакуации. В основе метода лежит сочетание моделей движения агентов и динамики среды. На основе данных об интенсивности волнения моделируется пространственно-временное поле морских волн; для этого используется модифицированная модель Лонге–Хиггинса. По набору случайных реализаций полей волнения рассчитываются перемещения, скорости и ускорения, обусловленные качкой судна. Они, в свою очередь, используются для расчета сил, действующих на агента; таким образом, на каждой итерации моделирования доступна информация о положении судна относительно неподвижной системы отсчета. Для каждой реализации полей волнения итерации повторяются до тех пор, пока не будет обеспечена эвакуация всех агентов.

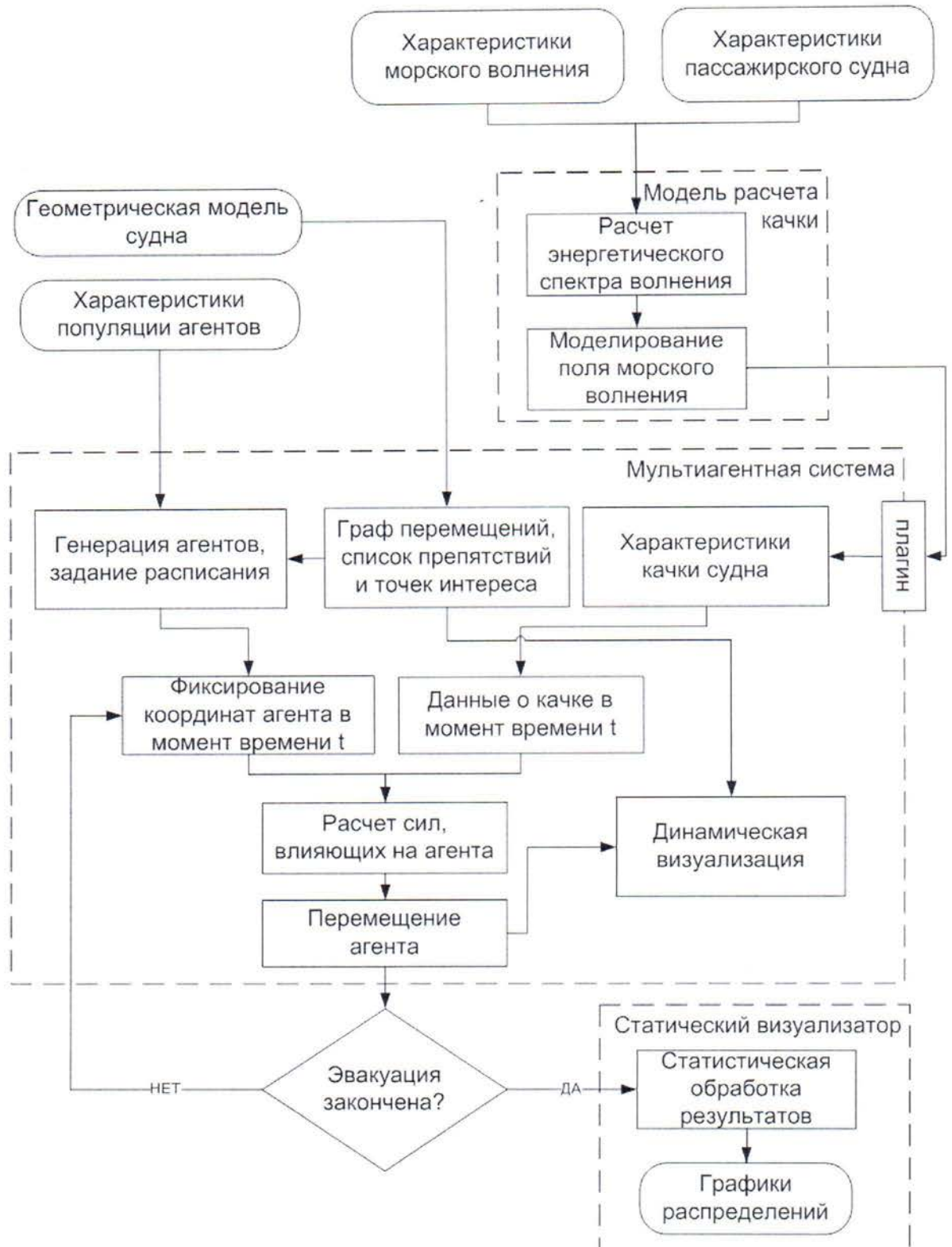


Рисунок 3 – Алгоритм МА-моделирования процесса эвакуации с аварийного судна в штормовых условиях

Входными данными для моделирования является геометрическая модель судна, создаваемая посредством программы 3ds Max 2015. Модель включает несколько уровней, каждый уровень соответствует одной палубе, на палубах расположены определенные помещения (согласно плану судна); отдельно обозначены группы точек интереса. Граф передвижения агентов ге-

нерируется автоматически с использованием метода растеризации пространства через квадродерево. После инициализации МА-модели и запуска сценария эвакуации на каждой итерации фиксируются координаты всех агентов. Далее эти координаты и данные о перемещениях, скоростях и ускорениях судна передаются для вычисления сил в уравнениях (1)–(2), в частности, при расчете силы, действующей на агента во время качки. Затем в зависимости от полученного вектора результирующей силы находится следующая точка для перемещения каждого агента (она может находиться на препятствии, если произошло столкновение). Эвакуация считается успешно завершенной, если каждый агент достиг точки назначения. Агент, не нашедший путь от текущей точки до эвакуационного выхода (в том числе из-за потери подвижности при ударе о стену), считается «погибшим» и учитывается отдельно при обработке результатов.

В силу того что для работы модели эвакуации могут использоваться принципиально различные модели динамики судна, представленные разными программными системами, для проведения массовых расчетов был разработан распределенный экспериментальный стенд на основе облачной платформы CLAVIRE. Стенд включает в себя набор композитных приложений, содержащих программные модули, обеспечивающие расчет качки по линейной спектральной модели, нелинейной параметрической модели и полной имитационной модели, с возможностью передачи полученных результатов в модуль моделирования движения агентов в соответствии с рис. 3. Кроме того, в состав стенда входит визуализатор процессов эвакуации, обеспечивающий работу как в пакетном, так и в интерактивном режиме.

На рис. 4 приведена общая схема экспериментального стенда. С использованием экспериментального стенда проведены исследования вычислительной производительности метода. В качестве расчетного примера рассматривалось пассажирское судно «Коста Аллегра» со следующими характеристиками: водоизмещение 28 597 брт, длина 187.69 м, ширина 25.75 м, осадка 8.20 м, пассажироместность 1066 человек. Результаты расчетов показали, что метод достаточно ресурсоемок: модельное время МА-системы для эвакуации 1000 агентов сопоставимо с реальным временем. Это ограничивает возможности его прямого использования в бортовых системах обеспечения безопасности мореплавания, однако оставляет широкие возможности для построения расчетных сценариев и применения в составе систем исследовательского проектирования судов и объектов океанотехники.



Рисунок 4 – Общая схема экспериментального стенда

**В главе 4** приведены результаты вычислительных экспериментов, позволяющих исследовать влияние качки судна в различных режимах на такие характеристики эвакуации, как распределение времени и число успешно эвакуированных пассажиров.

Целесообразность исследований обусловлена тем, что воспроизвести такие ситуации в активном натурном эксперименте не представляется возможным. Однако косвенным путем оценить работоспособность метода возможно, используя документальные свидетельства жертв морских катастроф<sup>5</sup>.

На рис. 5 представлены примеры ядерных оценок характеристик эвакуации, полученных по выборкам метода Монте-Карло (см. рис. 3). На рис. 5, а приведены распределения времени эвакуации для судна без хода с курсовым углом  $30^\circ$ , полученные для двух моделей: мотивационная SF-модель (P1), не учитывающая влияния ускорений на траекторию движения при столкновении с другими агентами и препятствиями, а также полная модель (P2), реализуемая алгоритмом (см. рис. 3). На рис. 5, б представлено распределение доли агентов, эвакуировавшихся в соответствии с моделью P2 без травм, вызванных столкновениями с другими агентами и препятствиями. Из рис. 5, б видно, что даже в отсутствие качки учитывается возможность получения агентами травм вследствие давки, возникающей при движении в тамбурах и на трапах.

<sup>5</sup> Например, документы и свидетельства катастрофы парохода «Адмирал Нахимов», произошедшей в 1986 году (электронный источник <<http://admiral-nakhimov.net.ru/new/>>).

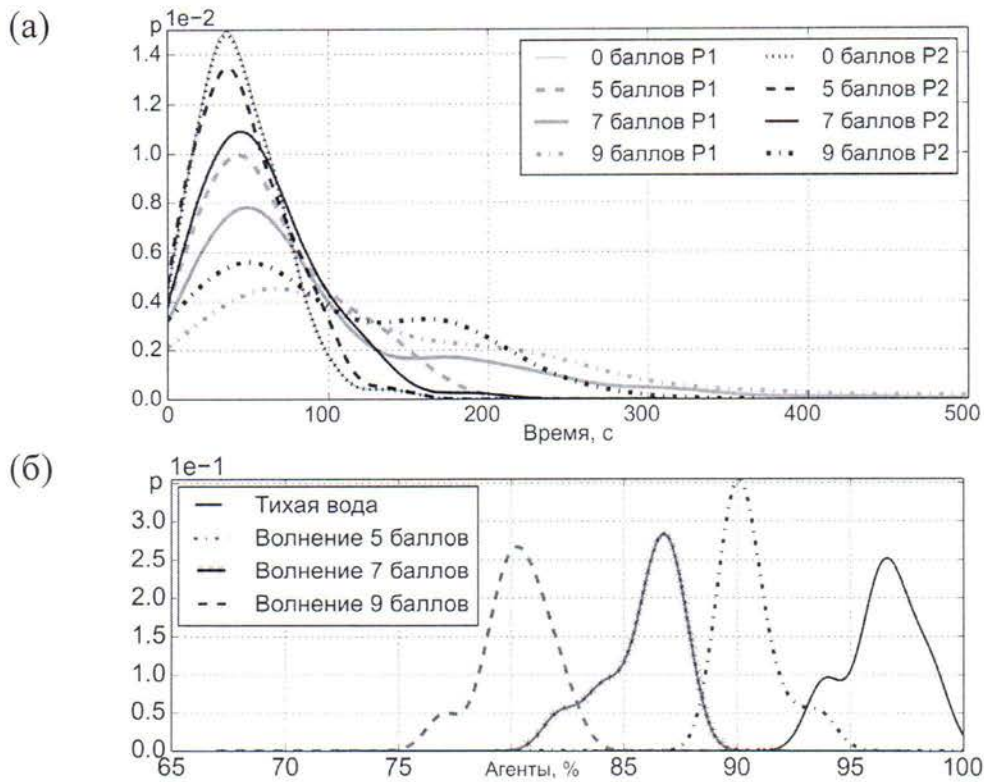


Рисунок 5 – Ядерные оценки характеристик эвакуации по результатам моделирования

В целом проведенные в данной главе вычислительные эксперименты показали, что метод моделирования реалистично воспроизводит специфику эвакуации при качке судна в штормовых условиях, включая эффекты (а) соприкосновения с препятствиями, в том числе падения; (б) поддержания равновесия (стремление к стенам, поручням, леерам); (в) совместного влияния килевой и бортовой качки на скорость движения человека; (г) возникновения давки в толпе в узких проходах и эвакуационных выходах; (д) движения «по стенке» при больших углах статического крена. При этом, в силу ресурсоемкости метода, возможно его опосредованное использование в бортовых системах поддержки принятия решений при мониторинге безопасности мореплавания, например, в форме предрассчитанных круговых диаграмм ускорений (и связанных с ними характеристик времени эвакуации) для различных углов и скоростей движения<sup>6</sup> судна в зависимости от загрузки и условий эксплуатации. Кроме того, поскольку разработанный метод обеспечивает процесс имитационного моделирования, он может быть использован при создании виртуального лабораторного практикума на основе платформы CLAVIRE для обучения судоводителей и членов экипажа действиям в экстремальных ситуациях.

<sup>6</sup> Обычно при эвакуации и посадке в шлюпки аварийное судно не имеет хода. Однако также возможны ситуации, когда судно находится на ходу (например, временная эвакуация пассажиров на верхнюю палубу из-за задымления).



**Заключение.** В ходе выполнения диссертационной работы были получены следующие результаты:

- на основе анализа современных методов моделирования пешеходной мобильности и существующих программных решений сформулированы требования к методу моделирования эвакуации с аварийного судна и разработана информационная модель на основе МА-среды с характеристиками, изменяющимися под воздействием ветроволновых возмущений нерегулярной природы;
- разработан метод моделирования эвакуации с аварийного судна в штормовых условиях, совокупно использующий механизмы SF и RVO и учитывающий локальные ускорения, действующие на агента в условиях сильной качки (включая движение при меняющемся ускорении, падение, сохранение равновесия за счет неподвижных предметов и пр.);
- разработаны программная среда для МА-моделирования эвакуации с аварийного судна, а также экспериментальный стенд для выполнения численных расчетов на основе облачной платформы CLAVIRE, интегрирующий различные модели динамики внешней среды (морского волнения), качки судна и процессов эвакуации;
- экспериментально изучена производительность разработанного метода, проведено численное исследование временных характеристик процессов эвакуации при различных условиях эксплуатации на примере пассажирского судна «Коста Аллегра», подтвердившее работоспособность метода.

**Список публикаций по теме диссертации**

1. *Бухановский А.В., Балахонцева М.А.* Мультиагентное моделирование процесса эвакуации пассажиров аварийного судна в штормовых условиях // Изв. вузов. Приборостроение. 2015. № 8. С. 614–620. **(входит в перечень ВАК)**
2. *Knyazkov K.V., Balakhontceva M.A., Ivanov S.V.* Towards a framework for simulation-based evaluation of personal decision support systems for flood evacuation // Proc. 14th GeoConference on Informatics, Geoinformatics and Remote Sensing. SGEM-2014. Vol. I. Informatics and Geoinformatics. 2014. P. 883–894. **(входит в перечень ВАК, Scopus)**
3. *Nasonov D., Butakov N., Balakhontseva M., Knyazkov K., Boukhanovsky A. V.* Hybrid Evolutionary Workflow Scheduling Algorithm for Dynamic Heterogeneous Distributed Computational Environment // International Joint Conference SOCO'14-CISIS'14-ICEUTE'14. Springer International Publishing, 2014. P. 83–92. **(входит в перечень, Scopus)**
4. *Болгова Е.В., Богачева А.В., Балахонцева М.А., Князьков К.В., Духанов А.В., Хоружников С.Э.* Автоматизация процесса разработки виртуальных лабораторных практикумов на основе облачных вычислений // Информационно-измерительные и управляющие системы. 2012. № 11. С. 71–81. **(входит в перечень ВАК)**
5. Балахонцева М.А., Карбовский В.А., Чуров Т.Н. Регрессионное тестирование для платформы облачных вычислений CLAVIRE // Труды XVIII Байкальской Всероссийской конференции "Информационные и математические технологии в науке и управлении". Иркутск: ИСЭМ СО РАН, 2013. Ч. III. С. 219–224.