tions of the mass, velocity and braking coefficient. These functions are approximated by the polynomials up to degree-4. The computer research stand was developed, including the mathematical model of Tupolev Tu-204. The deterministic and statistical tests within the range of the aircraft mass of 70–105 tons, approach speed of 200–220 km/h and friction coefficient of 0,3–0,75 were performed. The estimates of the accuracy of the forecast on the basis of the tests are presented.

Keywords: energy approach, forecasting method, information support, landing

Acknowledgements: The work was supported by the Russian Foundation for Basic Research, project no. 15-08-02943 A.

For citation:

Shevchenko A. M. Research and Development of a Method for Forecasting of Rollout Distance of an Aircraft, *Mekhatronika, Avtomatizatsiya, Upravlenie*, 2015, vol. 16, no 12, pp. 841–847.

DOI: 10.17587/mau/16.841-847

References

1. **Rallo N.** The European Regional Aviation Safety Group (RASG-EUR), *FSFI International Workshop*, 15 May 2012.
2. **Rallo N.** Runway safety: the big picture, *ICAO Regional Runway Safety Seminar (RRSS)*, Moscow, 6–8 November 2012.
3. **Sharov V.** Development of Overrun Prognosis System in Volga-Dnepr Airline, *ICAO Regional Runway Safety Seminar (RRSS)*, Moscow, 6–8 November 2012.
4. **Jarinov S.** Role of the Regulator, *ICAO Regional Runway Safety Seminar (RRSS)*, Moscow, 6–8 November 2012.
5. **Sharov V. D.** Metodika ocenki veroyatnosti vykatyvaniya vozdukhnykh sudov za predely VPP pri posadke (Method of assessing the probability of rolling out the aircraft off the runway during landing), *Nauchnyy Vestnik MGTU Grazhdanskoy Aviacii*, 2007, no. 122.
6. **Statistical Summary of Commercial Jet Airplane Accidents, Worldwide Operations 1959–2012.** Boeing, August 2012, available at <http://www.boeing.com/news/techissues/pdf/statsum.pdf>
7. **Kofman V. D., Poltavec V. A., Tejmurazov R. A.** Sravnitel'nyy analiz bezopasnosti poletov otechestvennykh i zarubezhnykh samoletov (Comparative analysis of the safety of domestic and foreign aircraft), *Transportnaya Bezopasnost' i Tehnologii*, 2005, no. 4 (5).

8. **Borisov V. G., Pavlov B. V., Shevchenko A. M.** Sredstva informacionnoy podderzhki pilota v neshtatnykh situatsiyah (Information support of the pilot in emergency situations), *Proc. 7th scientific and engineering. Conf. "Mechatronics, Automation, Control"*, St. Petersburg. JSC "Concern" Central Research Institute of Electrical Appliance", 2010, pp. 74–77.

9. **Shevchenko A. M., Pavlov B. V., Nachinkina G. N.** Metod prognozirovaniya vzleta samoleta pri nalichii vysotnykh prepyatstviy (The method of predicting takeoff if tall obstacles), *Izv. Juzhnogo federal'nogo universiteta. Tehn. nauki*, 2012, no. 3, pp. 167–172.

10. **Shevchenko A. M.** Some Means for Informational Support of Airliner Pilot, *5th Int. Scientific Conf. on Physics and Control (Physcon 2011)*, Leon, Spain, Sept. 5–8, 2011, pp. 1–5, available at <http://lib.physcon.ru/doc?id=78f90e41e746/>

11. **Kuznetsov A., Shevchenko A., Solonnikov Ju.** The Methods of Forecasting Some Events During the Aircraft Takeoff and Landing, *Proc. 19th IFAC Symposium on Automatic Control in Aerospace (ACA2013)*, Germany, 2013, pp. 183–187.

12. **Lambregts A. A.** Vertical Flight Path and Speed Control Auto-pilot Design Using Total Energy Principles, *AIAA Paper 83-2239CP*, 1983, pp. 559–569.

13. **Kurdjukov A. P., Nachinkina G. N., Shevtchenko A. M.** Energy approach to flight control, *AIAA Conf. Navigation, Guidance & Control*, AIAA Paper 98-4211, Boston, 1998.

14. **Pavlov B. V., Shevchenko A. M., Nachinkina G. N.** Jenergeticheskij podhod i ego ispol'zovanie dlja proektirovaniya sistem upravleniya poletom (Energy approach and its use for the design of flight control systems), *Aktual'nye Problemy Aviacionnykh i Ajerokosmicheskikh Sistem*, iss. 2 (16), vol. 8, 2003, pp. 24–43.

УДК 658.512.6

DOI: 10.17587/mau.16.847-852

О. И. Лакхин, руководитель направления аэрокосмических систем, e-mail: lakhin@smartsolutions-123.ru,
И. В. Майоров, руководитель отдела математического моделирования, e-mail: imayorov@smartsolutions-123.ru,
НПК "Разумные решения"

Метод адаптивного планирования грузопотока российского сегмента Международной космической станции на основе мультиагентной технологии¹

Постановка проблемы: рассматривается задача построения плана грузопотока Российского сегмента Международной космической станции (РС МКС). Задача представлена в виде динамического баланса интересов между потребностями и возможностями. **Методы:** предлагается метод адаптивного планирования грузопотока РС МКС в реальном времени, учитывающий приоритеты грузов. В основе данного метода лежат мультиагентные технологии для разрешения конфликтов путем переговоров агентов. Данный метод способен гибко и эффективно адаптировать план грузопотока по событиям в реальном времени. **Результаты:** разработанный метод применяется в мультиагентной системе планирования грузопотока РС МКС и использует мультиагентную платформу для планирования в реальном времени.

Ключевые слова: поддержка принятия решений, адаптивное планирование, мультиагентная технология, планирование грузопотока, события

Введение

Обеспечение жизнедеятельности и проведение научных исследований на борту российского сегмен-

та Международной космической станции (РС МКС) требуют постоянного планирования доставки различных грузов, их возврата или утилизации, включая научную аппаратуру для космических экспериментов, запасные части, материалы и инструменты для ремонтов, запас топлива, воздуха, воды и пищи

¹ Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и образования РФ.

для космонавтов, результаты космических экспериментов и т. п.

Построение стратегических и тактических планов полета, а также доставки, возврата, утилизации и размещения на РС МКС грузов, в составе которых имеется более 3500 наименований объектов, — это сложная и трудоемкая задача, при решении которой необходимо учитывать множество факторов, ограничений и предпочтений, таких, например, как изменяющиеся потребности в топливе, воде и продовольствии, баллистика и солнечная активность, особенности типов кораблей и стыковочных модулей и т. д. При этом любое событие может оказывать влияние на программу полетов и план грузопотока, например, изменение дат старта и посадки, стыковки или отстыковки, состава экипажа и других параметров, что требует динамического перепланирования в цепочке изменений связанных между собой параметров, которые должны быть уточнены, перечислены и согласованы соответствующим образом.

Для решения такого класса сложных и динамичных задач все чаще применяется мультиагентный подход [1—2] — одно из наиболее перспективных направлений в области искусственного интеллекта (ИИ), в котором поиск решения сложной задачи может выполняться распределенным образом, с использованием принципов самоорганизации и эволюции, присущих живым организмам [3—5]. В развиваемом подходе используется концепция сетей потребностей и возможностей (ПВ-сетей), в которой любой план строится как гибкая (перестраиваемая по событиям) сеть связей агентов потребностей (заявок) и возможностей (ресурсов) [6—7].

В данной статье рассматривается метод планирования грузопотока РС МКС, развивающий предложенный ранее метод сопряженных взаимодействий в ПВ-сетях за счет использования приоритетов грузов. Показываются преимущества разработанного решения для адаптивной обработки событий, не требующей останова и перезапуска системы, а также перспективы его развития.

1. Задача планирования грузопотока РС МКС

Для формулировки математической постановки задачи планирования ресурсов транспортных кораблей предполагается, что каждый из запросов (заказов) на ресурсы и каждый ресурс могут иметь собственные критерии принятия решений (например, сроки, себестоимость, риск и др.), причем их важность может изменяться в ходе выполнения задач.

Для унификации критериев, предпочтений и ограничений для заявок и ресурсов вводится понятие удовлетворенности соответствующих агентов.

Структуру планов грузопотока РС МКС можно описать через набор планов ресурсов и заказов на доставки, возврат или утилизацию грузов, где на нижнем уровне ресурсы представлены конкретными

местами в транспортном корабле. Заказы на этом уровне — элементарные грузы, не делимые на составляющие. Более крупные планы — контейнеры для оборудования и баки для размещения топлива, воды и газов и т. д.

При этом каждому плану уровня h (полета транспортного корабля, контейнеров для грузов, баков для топлива и т. п.) ставятся в соответствие цели ресурсов и заказов, состояние которых описывается через функции удовлетворенности $u_j^{res\ h}$ по критериям i из множества $\{x_i^h\}$ с весом $\alpha_{ij}^{res\ h}$, показывающие, насколько критерии отклоняются от желаемых значений $x_{ij}^{id\ h}$ для данного ресурса j по плану h . Функции удовлетворенности задаются в кусочно-линейном виде по аргументам. Значения функций удовлетворенности лежат в сегменте от 0 до 1. Критерии сворачиваются аддитивным способом в единую функцию удовлетворенности. В данной модели целевая функция ресурсов (res) на плане уровня h по удовлетворенности зависит от отклонения критериев x_i^h , от значений критериев на предшествующем уровне $h-1$ и значений удовлетворенности ресурсов и задач на выбранном уровне плана. Аналогично может быть задана функция с весом $\beta_{mn}^{task\ h}$ удовлетворенности заказов (задач) $u_n^{task\ h}$ на уровне плана h , в качестве критериев рассматривается множество $\{y_n^h\}$. На уровне таких планов для ресурсов и задач вводятся приоритеты $\{w_j^{res\ h}\}$ и $\{w_n^{task\ h}\}$ соответственно. Тогда задача оптимизации плана доставки грузов сводится к максимизации удовлетворенности ресурсов и заявок для планов уровня $h = 1...H$:

$$\begin{aligned} u^h &= u^{res\ h} + u^{task\ h} = \\ &= \sum_j w_j^{res\ h} u_j^{res\ h} + \sum_n w_n^{task\ h} u_n^{task\ h} = \\ &= \sum_j w_j^{res\ h} \sum_i \alpha_{ij}^{res\ h} f_{ij}^{res\ h}(x_i^h - x_{ij}^{id}, x_i^{h-1}, f_{ij}^{res\ h-1}) + \\ &+ \sum_n w_n^{task\ h} \sum_m \beta_{mn}^{task\ h} f_{mn}^{task\ h}(y_m^h - x_{mn}^{id}, y_n^{h-1}, f_{mn}^{task\ h-1}); \end{aligned}$$

$$x^{res\ h*} = \max_{x_i^h}(u^{res\ h}); \quad (1)$$

$$y^{task\ h*} = \max_{y_m^h}(u^{task\ h}),$$

где $x^{res\ h*}$ и $y^{task\ h*}$ — оптимальные значения критериев переменных ресурсов и задач для планов уровня h . Для плана нижнего уровня 1 функции компонент удовлетворенности f_{ij} при $h = 1$ зависят только от отклонений аргументов.

Переменные x и y лежат в области критериев ресурсов D^I и D^M заявок, I и M — размерности соответствующих пространств:

$$x_i \in D^I, y_m \in D^M \forall i, j, I = \text{Dim}(D^I), M = \text{Dim}(D^M).$$

Таким образом, задача планирования сформулирована в системе как задача максимизации удовлетворенности всех участников. Рекурсивность задачи (1) по уровню планов и нелинейность по зависимостям от решений на предшествующем уровне допускает итерационное решение с помощью "вложенных" сетевых мультиагентных планировщиков, что доказывается результатами экспериментальной реализации в различных приложениях.

В результате получаемое решение ("хорошее расписание") должно быть найдено как баланс (равновесие) интересов заказов и ресурсов, что может достигаться выявлением и разрешением конфликтов путем переговоров и согласованным принятием решений всех тех участников, на состояние которых может оказать влияние очередное новое событие.

2. Предлагаемый подход к решению задачи

В предлагаемом подходе решение любой сложной задачи распределения, планирования и оптимизации ресурсов рассматривается как поиск баланса интересов всех участников, что достигается путем выполнения последовательных приближений от самого грубого, простого, но быстро получаемого решения — к более сложным и лучшим решениям, что важно для оперативной и гибкой адаптации планов по событиям в реальном времени.

В этих целях предлагается набор базовых программных агентов, которые стараются добиться заданных им целевых установок (идеальных значений показателей) и, даже получив максимум возможного в текущей ситуации, не оставляют попыток их улучшить.

Например, груз при планировании хочет быть доставленным точно в срок и с минимальной ценой, а транспортный корабль — максимально эффективно использованным, т. е. не иметь недогруза или перегрузки. Груз получает активность и быстро размещается в расписание на первое свободное место в корабле, но дальше может активироваться сам корабль, который будет оценивать свое состояние и пытаться его улучшить за счет привлечения недостающих ему грузов.

Выигрыш в эффективности при использовании мультиагентных технологий достигается за счет перехода к принятию решений "по ситуации" в реальном времени, когда пользователь, а в будущем и сама система, смогут управлять важностью критериев.

Разработанный подход основан на концепции "холона", предложенного для построения мультиагентных систем в работе [8], где допускается вложенность и связанность многоуровневых планов и впервые были введены специальные классы аген-

тов "заказов" (грузов), "продуктов" (в данном случае, полетов) и "ресурсов" (транспортных кораблей), а также "штабной агент" для координации решений.

Такой подход применяется для решения задачи многокритериального планирования заказов на ресурсы, в числе критериев для такой задачи традиционно рассматриваются приоритеты грузов, объемы, типы, риски и др. Реализация мультиагентного подхода для решения рассматриваемой задачи адаптивного планирования грузопотока основана на использовании разработанной ранее концепции сетей потребностей и возможностей и метода сопряженных взаимодействий для управления ресурсами на виртуальном рынке в реальном времени [5, 9].

Требование "реального времени" здесь напрямую связано с обеспечением эффективного использования ресурсов, поскольку появление задержек в принятии решений о распределении ресурсов может привести к потере качества обеспечения РС МКС или к полному срыву сроков поставки грузов. В таких условиях, когда ни число заказов, ни число ресурсов заранее не известны, применение классических методов распределения, планирования и оптимизации ресурсов чаще всего оказывается неприемлемым на практике.

Предлагается использовать метод, развивающий разработанный ранее метод сопряженных взаимодействий за счет использования приоритетов, позволяющий решать задачи управления распределением разнородных ресурсов РС МКС в реальном времени.

3. Модификация метода сопряженных взаимодействий

Предлагаемый метод учитывает особенности планирования грузопотока на РС МКС и приоритеты грузов различного назначения. Модифицированный метод состоит из двух фаз: первоначальной инициализации размещения грузов по полетам и проактивного улучшения состояний заказов и грузов.

Предполагается, что потребности в грузопотоке изначально заданы, и имеется начальная программа полета. У всех грузов грузопотока заданы массы грузов, их типы и виртуальные стоимости и временной диапазон доставки.

При поступлении новой заявки на размещение груза происходит следующее:

1. Иницируется создание нового агента груза.
2. Агент нового груза опрашивает агентов запусков (полетов) транспортных кораблей, включенных в план полета РС МКС, относительно принципиальной возможности планирования доставки в рамках данного полета и получает от них ответы.
3. Агент нового груза анализирует и ранжирует возможные варианты по их выгодности для себя (оценка осуществляется в соответствии со степенью соответствия варианта требованиям нового груза, упорядоченным по степени важности).

4. Если свободного места на выбранном грузом полете транспортного корабля достаточно для размещения (груз проходит по весу и объемам), доставка данного груза включается в план грузопотока.

5. Начинаются переговоры по разбору конфликта и поиску его разрешения путем перемещения непосредственно конфликтующих грузов между полетами, а также тех, кто вовлекается в конфликты далее, причем используются протоколы разрешения конфликтов, связанные со сдвигами в пределах ресурса, вытеснением на другой ресурс и обменами между ресурсами.

6. Порядок активации агентов зависит от приоритетов групп грузов и ситуации, складывающейся в ПВ-сети.

7. Каждый агент на этапе проактивного улучшения планов делает попытку улучшить свое размещение для повышения функции удовлетворенности.

8. Работа метода завершается, когда ни один агент более не может улучшить ситуацию, вышло время для планирования или решение несущественно улучшается в пределах заданного порога.

В результате получаемая ПВ-сеть представляет собой пример самоорганизующейся системы, формирующей и изменяющей расписания ресурсов, а также адаптирующей свое поведение под действием событий, происходящих в реальном времени.

4. Оценка эффективности метода адаптивного планирования грузопотока РС МКС

Для оценки эффективности разработанного метода адаптивного планирования грузопотока РС МКС было проведено экспериментальное исследование зависимости времени обработки событий и формирования нового плана грузопотока от загрузки грузами транспортного средства.

Решение поставленной задачи проводилось с применением одного из точных методов решения, в качестве которого использовался метод ветвей и границ, и модификации метода сопряженных взаимодействий.

В проведенной серии экспериментов задавалось число грузов в диапазоне от 100 до 1000 грузов. Результаты испытаний на одних и тех же детерминированных наборах исходных данных (см. рисунок)

показали, что:

- модифицированный метод сопряженного взаимодействия находит допустимые решения за меньшее время, чем точный метод ветвей и границ;
- значения целевых функций, найденные модифицированным методом сопряженных взаимодействий, имеют отклонение от глобального экстремума в пределах 10...15 %.

Исходя из результатов проведенного экспериментального исследования можно сделать вывод, что для решения на практике рассматриваемой задачи модифицированный метод сопряженных взаимодействий является более предпочтительным.

Во второй серии экспериментов (1000 грузов), где сравнивались бесконфликтная фаза планирования с проактивной фазой планирования модифицированного метода сопряженных взаимодействий, адаптивный алгоритм планирования показал почти 15 %-ное преимущество над неадаптивным, использующим бесконфликтное планирование грузов в порядке поступления.

В третьей серии экспериментов оценивалась производительность системы, были проведены экспериментальные исследования по нагрузочному тестированию, которые показали, что время обработки поступающих событий в систему приемлемо при одновременной работе 150 пользователей и практически не имеет деградации с равномерным ростом числа пользователей.

Эксперименты показали, что применение метода адаптивного планирования грузопотока РС МКС на основе мультиагентных технологий, базирующегося на принципах самоорганизации и эволюции, имеет преимущество, и подтвердили его работоспособность и эффективность для решения задачи планирования грузопотока РС МКС, при этом обеспечивались оперативность и гибкость при перестроении плана грузопотока РС МКС по событиям в реальном времени.

Заключение

Рассмотрена постановка задачи и метод адаптивного планирования грузопотока, применяемый при создании интеллектуальной системы управления грузопотоком РС МКС на основе мультиагентной технологии.

В данной реализации системы планирования грузопотока применение мультиагентных технологий обеспечивает следующие преимущества:

- построение плана грузопотока РС МКС, близкого по своим параметрам к создаваемым опытными диспетчерами;
- гибкая и быстрая оперативная реакция на события, требующие перепланирования грузопотока;

Результаты экспериментальных исследований скорости формирования нового плана по событию

- возможность согласования полученных планов всеми участниками процесса планирования;
- сокращение ручного труда при планировании грузопотока, а также сложности и трудоемкости расчетов;
- повышение оперативности в принятии решений в 2...3 раза;
- возможность мониторинга и контроля исполнения планов в реальном времени;
- уменьшение зависимости от человеческого фактора, включая ошибки.

Разработанная система внедрена в промышленную эксплуатацию в ОАО "РКК "Энергия" и применяется для планирования грузопотока РС МКС.

Список литературы

1. **Wooldridge M.** An Introduction to Multi-Agent Systems. Chichester, England: John Wiley and Sons Ltd, 2002. 340 p.

2. **Vos S.** Meta-heuristics: The State of the Art in Local Search for Planning and Scheduling / Eds A. Nareyek. Berlin: Springer-Verlag, 2001. P. 1—23.

3. **Fatos Xhafa, Ajith Abraham.** Metaheuristics for Scheduling in Industrial and Manufacturing Applications. Springer Publishing Company, Incorporated, 2008. 342 p.

4. **Gongfa L.** A hybrid particle swarm algorithm to JSP problem // IEIT Journal of Adaptive & Dynamic Computing. 2011. P. 12—22.

5. **Rzevski G., Skobelev P.** Managing Complexity. Southampton, UK: WIT Press, 2014. 202 p.

6. **Виттих В. А., Скобелев П. О.** Метод сопряженных взаимодействий для управления распределением ресурсов в реальном масштабе времени // Автоматика. 2009. № 2. С. 78—87.

7. **Виттих В. А., Скобелев П. О.** Мультиагентные модели взаимодействия для построения сетей потребностей и возможностей в открытых системах // Автоматика и телемеханика. 2003. № 1. С. 177—185.

8. **Vittikh V. A., Larukhin V. B., Tsarev A. V.** Actors, Holonic Enterprises, Ontologies and Multi-Agent Technology // Proc. of 6th International Conference on Industrial Applications of Holonic and Multi-Agent Systems (HoloMAS'2013), August 26—28, 2013. Prague, Czech Republic. Springer, 2013. P. 13—24.

9. **Skobelev P.** Multi-Agent Systems for Real Time Adaptive Resource Management. In Industrial Agents: Emerging Applications of Software Agents in Industry / Paulo Leitao, Stamatis Karnouskos (Ed.). Elsevier, 2015. P. 207—230.

Multi-Agent Technology Method of Adaptive Cargo Traffic Scheduling for the International Space Station

O. I. Lakhin, lakhin@smartsolutions-123.ru✉, **I. V. Mayorov**, imayorov@smartsolutions-123.ru, SEC Smart Solutions Ltd., Samara, 443013, Russian Federation

Corresponding author: **Lakhin Oleg I.**, Department Manager, SEC Smart Solutions Ltd, Samara, 443013, Russian Federation, h./Fax: + 7 (846) 279-37-79, e-mail: lakhin@smartsolutions-123.ru

Received on August 28, 2015

Accepted on September 04, 2015

Problem statement: The task of real time cargo traffic scheduling for the International Space Station (ISS) is considered. The problem of strategic and tactical scheduling of the flights, delivery, return, disposal and allocation of ISS cargo traffic, including more than 3500 entities, is very complex and time-consuming. In order to solve this problem it is important to take into consideration numerous factors, constraints and preferences, such as changing fuel, water and supplies demand, ballistics and solar activity, particular types of spaceships and docking modules. Changes in dates of launch, landing, docking and undocking, crew size and other parameters affect the flight program and cargo traffic. These changes cause dynamic rescheduling in the chain of changes of the interconnected parameters, which would be specified, recalculated and coordinated. The problem is formalized as a dynamical balance of interests (consensus) between the orders and resources. **Methods:** The method of real-time adaptive cargo traffic rescheduling is proposed. The method is based on a multi-agent technology for identification and solving of conflicts by negotiations of agents. ISS cargo traffic scheduling method develops the suggested method of conjugate interactions in the Demand-Resource Networks (DRN) by using cargo priorities. The advantages of the suggested solution for the adaptive events processing without stopping and restarting of the system are shown. Benefits of the method include high flexibility and efficiency for the event-driven adaptation of the cargo schedules in real time. **Results:** The developed method was implemented in the multi-agent system for ISS cargo scheduling with the use of a multi-agent platform for real time scheduling. **Practical relevance:** The developed system is based on the multi-agent technologies and is now in commercial operation. It is applied in the cargo traffic scheduling for the Russian Segment of ISS. The system ensures such advantages as ISS cargo traffic scheduling similar to the schedules created by experienced operators; flexible and quick reaction to the events which cause cargo traffic rescheduling; double or triple reduction of the manual labor and increase of the decision-making efficiency; real-time monitoring and control of the schedule implementation.

Keywords: decision support, adaptive planning, multi-agent technology, planning, traffic, events

Acknowledgements: The work was supported by the Ministry of Education and Science of the Russian Federation.

For citation:

Lakhin O. I., Mayorov I. V. Multi-Agent Technology Method of Adaptive Cargo Traffic Scheduling for the International Space Station, *Mekhatronika, Avtomatizatsiya, Upravlenie*, 2015, vol., no. 4, pp. 847—852.

DOI: 10.17587/mau/16.847-852

References

1. **Wooldridge M.** An Introduction to Multi-Agent Systems. John Wiley and Sons Ltd, Chichester, England, 2002, 340 p.

2. **Vos S.** Meta-heuristics: The State of the Art in Local Search for Planning and Scheduling, eds A Nareyek, Springer-Verlag, Berlin, 2001, pp. 1—23.

3. **Fatos Xhafa, Ajith Abraham.** Metaheuristics for Scheduling in Industrial and Manufacturing Applications, Springer Publishing Company, Incorporated, 2008, 342 p.

4. **Gongfa L.** A hybrid particle swarm algorithm to JSP problem // *IEIT Journal of Adaptive & Dynamic Computing*, 2011, pp. 12—22.
5. **Rzevski G., Skobelev P.** Managing Complexity, Southampton, UK, WIT Press, 2014, 202 p.
6. **Vittikh V. A., Skobelev P.** Metod sopryazhennykh vzaimodeystviy dlya upravleniya raspredeleniem resursov v real'nom masshtabe vremeni (Open multi-agent systems for decision-making support), *Avtometriya, Journal of Siberian Branch of Russian Academy of Science*, 2002, no. 6, pp. 45—61 (in Russian).
7. **Vittikh V., Skobelev P.** Mul'tiagentnye modeli vzaimodeystviya dlya postroeniya setey potrebnostey i vozmozhnostey v otkrytykh sistemah (Models of Self-organization for Designing Demand-Resource Networks), *Automation and Control, Journal of Russian Academy of Science*, 2003, no. 1, pp. 177—185 (in Russian).
8. **Vittikh V. A., Larukhin V. B., Tsarev A. V.** Actors, Holonic Enterprises, Ontologies and Multi-Agent Technology, *Proc. of 6th International Conference on Industrial Applications of Holonic and Multi-Agent Systems (HoloMAS'2013)*, August 26—28, 2013, Prague, Czech Republic. Springer, 2013, pp. 13—24.
9. **Skobelev P.** Multi-Agent Systems for Real Time Adaptive Resource Management. In *Industrial Agents: Emerging Applications of Software Agents in Industry*. Paulo Leitao, Stamatis Karnouskos (Ed.). Elsevier, 2015, pp. 207—230.

УДК 004: 656.61.073

DOI: 10.17587/mau.16.852-860

В. М. Дорожко, канд. физ.-мат. наук, ст. науч. сотр., veniamin_dorozhko@mail.ru,
Институт автоматизации и процессов управления ДВО РАН, г. Владивосток

Устойчивость контура морского судна к опрокидыванию "волной-убийцей"

Рассмотрен CFD-метод исследования устойчивости контуров морских судов при воздействии "волн-убийц". Предложена модель системы "контур—волна-убийца". Выполнено обоснование выбранного диапазона длин "волн-убийц". Приведены результаты численного исследования устойчивости контуров рыбопромысловых судов водоизмещением 1389—9260 т в зависимости от их начального удаления от "волн-убийц" различной длины. Отмечается связь опрокидывания контуров с крутизной переднего склона "волны-убийцы". Полученные результаты могут быть использованы при проектировании и разработке мероприятий по обеспечению безопасной эксплуатации судов.

Ключевые слова: устойчивость судна, вычислительная гидродинамика, "волна-убийца", крутизна волны, угол крена, контур судна, опрокидывание судна

Введение

"Волны-убийцы" представляют собой уникальное природное явление, они способны опрокинуть или причинить серьезные повреждения морским судам и сооружениям. Для идентификации "волн-убийц" используют критерий [1], который связан с определением высоты волны: $H > 2H_s$, где H_s — значительная высота волн (средняя высота трети наиболее высоких волн спектра морского волнения).

Известны различные гипотезы возникновения "волн-убийц" [2]. Одной из общепризнанных причин их возникновения является пространственно-частотная фокусировка, вследствие которой происходит формирование волны, в которой развиваются процессы модуляционной неустойчивости [3, 4]. В результате модуляционной неустойчивости формируется солитон, под огибающей которого могут находиться от 3 до 20 периодов волн. "Волна-убийца" представляет собой конечную стадию развития модуляционной неустойчивости, когда за время порядка одного периода происходит концентрация энергии в гребне волны, в результате ее максимальная высота может достигать 30 м [5], после чего "волна-убийца" начинает обрушаться [6]. Существует большое число работ, в которых аналитически, численно и экспериментально исследуются способы формирования "волн-убийц", например, статьи [7—9].

Актуальность исследования "волн-убийц" поддерживается не только тем, что они представляют собой загадочное явление природы, но и реальной опасностью, которую они создают для морских судов. Только за период 1968—1994 гг. от встречи с "волнами-убийцами" погибло или было повреждено 22 супертанкера [10]. Наблюдения в 2000—2003 гг. за морской поверхностью в рамках проекта MaxWave [11] показали, что частота возникновения "волн-убийц" существенно выше, чем прогнозируется теоретическими исследованиями [1]. Так, только за период 2006—2010 гг. было отмечено 78 случаев регистрации "волн-убийц", при встрече с которыми погибли или получили повреждения суда и люди [12]. В связи с высокой частотой регистрации "волн-убийц" Европейским союзом был профинансирован проект Extreme Seas [13], в рамках которого планировалось объединение усилий шести европейских стран, в том числе российских ученых [9], с целью разработать численные и физические имитационные модели возникновения "волн-убийц", а также оценить их угрозу в отношении морских судов. В свете указанных задач можно отметить работы, в которых численно [14] и экспериментально [15] исследуется воздействие "волн-убийц" на морские суда. В качестве недостатка этих работ можно отметить отсутствие исследований опрокидывания морских судов.