

DEFINING PARAMETERS OF EQUILIBRIUM STRANDING OF A SHIP USING SIMULATION MODELLING

D. A. Egorov¹, I. G. Gankevich², A. B. Degtyarev²

¹ — Admiral Makarov State University of Maritime and Inland Shipping,
St. Petersburg, Russian Federation

² — St. Petersburg University, St. Petersburg, Russian Federation

Equilibrium stranding of a ship is a necessary preliminary step for application of other decision support system algorithms, such as identification of a flooded compartment, predicting an emergency vessel capsizing probability, and others. The equilibrium stranding using a real ship as an example based on the heel angle sensors readings for rolling and pitching, and the water column pressure sensors readings for the vertical roll, is calculated. In the linear case, the mean value of an individual value coincides with the equilibrium position on the corresponding coordinate axis. However, a ship rolling in a sea is, as a rule, non-linear process, and hence the mathematical average correction is required. The use of the Nechaev's method for determining the equilibrium position of a floating vessel in a heavy sea is illustrated in the paper. An algorithm based on simulation modeling in the Virtual Testbed software package is proposed. It has been proved that complication of wave model used for coefficients obtaining in Y. I. Nechaev's algorithm changes obtained equilibrium parameter value insignificantly, but in this case time spent for generation of one simulation is increased significantly enough. When using linear waves or Stokes waves, the generation of two minutes of simulation is faster than two minutes of real time; when using Gerstner waves, the simulation time approaching three minutes of real time, which already exceeds the simulation time. In this case, when using the Stokes waves model, it is possible to achieve the results closer to the Gerstner model than when using the linear waves model without consuming additional time. This fact allows us to conclude about the optimal use of the algorithm.

Keywords: simulation, ship rolling, equilibrium stranding, sea wave model, ship stability.

For citation:

Egorov, Denis A., Ivan G. Gankevich, and Aleksandr B. Degtyarev. "Defining parameters of equilibrium stranding of a ship using simulation modelling." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admiral S. O. Makarova* 14.5 (2022): 736–747. DOI: 10.21821/2309-5180-2022-14-5-736-747.

УДК 004.942

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ РАВНОВЕСНОЙ ПОСАДКИ СУДНА С ПОМОЩЬЮ ИМИТАЦИОННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

Д. А. Егоров¹, И. Г. Ганкевич², А. Б. Дегтярев²

¹ — ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени адмирала С. О. Макарова»,
Санкт-Петербург, Российская Федерация

² — Санкт-Петербургский государственный университет,
Санкт-Петербург, Российская Федерация

Темой предлагаемого исследования является определение равновесной посадки, которая представляет собой необходимый предварительный этап применения других алгоритмов систем поддержки принятия решений, таких как идентификация затопленного отсека, прогнозирование вероятности опрокидывания аварийного судна и др. Выполненное вычисление равновесной посадки на реальном судне производится по показаниям датчиков углов крена для бортовой и килевой качки и датчиков давления водяного столба для вертикальной качки. В линейном случае математическое ожидание отдельно взятой величины совпадает с положением равновесия по соответствующей оси координат. Однако качка судна на морском волнении является, как правило, нелинейным процессом, а значит, требуется поправка относительно математического среднего. В статье проиллюстрировано использование метода Нечаева для определения равновесного положения судна, плавающего в море при сильном волнении. Предложен алгоритм, основанный на имитационном моделировании в программном комплексе «Виртуальный полигон». Обосновано,

что усложнение модели волн, используемой для получения коэффициентов в алгоритме Ю. И. Нечаева, мало изменяет полученное значение равновесного параметра, однако при этом значительно увеличивается время, затраченное на генерацию одной симуляции. Если при использовании линейных волн или волн Стокса генерация в течение двух минут симуляции происходит быстрее чем за две минуты реального времени, то при использовании волн Герстнера время симуляции приближается к трем минутам реального времени, что уже превышает время симуляции. При этом при использовании модели волн Стокса можно добиться более приближенных результатов к модели Герстнера, чем при использовании модели линейных волн, не затрачивая дополнительного времени, что позволяет сделать вывод об оптимальном варианте использования алгоритма.

Ключевые слова: имитационное моделирование, качка судна, равновесная посадка, модель морского волнения, остойчивость судна.

Для цитирования:

Егоров Д. А. Определение параметров равновесной посадки судна с помощью имитационного моделирования / Д. А. Егоров, И. Г. Ганкевич, А. Б. Дегтярев // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2022. — Т. 14. — № 5. — С. 736–747. DOI: 10.21821/2309-5180-2022-14-5-736-747.

Введение (Introduction)

Судоходство всегда было связано с различного рода опасностями. В настоящее время особую актуальность приобрело направление по созданию систем для предотвращения опасных ситуаций или минимизации их последствий [1], [2]. Также получило распространение имитационное моделирование [3], [4], так как оно является менее затратным, чем материальное, и позволяет получить результат для более широкого спектра экстремальных ситуаций. На стыке этих двух отраслей появился проект «Виртуальный полигон» [5], [6] как система поддержки принятия решений в выборе действий, предпринимаемых в экстремальных ситуациях, на основе базы знаний, полученных с помощью имитационного моделирования.

В большинстве случаев определение значения текущей равновесной посадки является некоторой отправной точкой для полноты информации о состоянии судна. Равновесная посадка с математической точки зрения определяется углом, на который отклоняется судно от положения равновесия с учетом перемещений грузов, затопления отсеков и других факторов, возникающих во время его эксплуатации. В основе системы поддержки принятия решений в выборе действий, предпринимаемых в экстремальных ситуациях, таких как затопление отсеков, развитие аварии, пожар и др., а также при прогнозировании изменения состояния аварийного судна, принятии решения о времени покидания гибнущего судна и т. п., может быть использован мониторинг ее изменения.

Целью исследования является нахождение алгоритма, с помощью которого можно корректно определить положение равновесия плавающего судна в море, а также его реализацию в рамках имитационного моделирования качки судна; встраивание данного алгоритма в существующий проект «Виртуальный полигон», провести эксперименты с различными моделями волнения и определить рациональность их использования.

Методы и материалы (Methods and Materials)

Существующие проблемы корректного определения положения равновесия находящегося в море судна в первую очередь связаны с тем, что в реальных условиях судно не находится в состоянии покоя, а совершает некоторые колебательные движения вокруг своего положения равновесия. Вследствие этого невозможно использовать методику определения равновесных значений посадки, сходную с процедурой, применяемой при креновании. Таким образом, можно сделать вывод, что на борту судна невозможно как непосредственное, так и косвенное измерение положения равновесия, но можно, с той или иной степенью точности, записывать процессы колебаний судна на волнении, т. е. вертикальную, бортовую и килевую качку. При этом использование временных реализаций качки судна для определения равновесного положения является еще более сложным процессом ввиду наличия рассмотренных далее факторов.

1. Качка судна, при достаточно быстром изменении нагрузки, особенно в аварийных условиях, в силу возможного поступления воды или перемещения ее из отсека в отсек, не являющаяся стационарным процессом. Следовательно, для мгновенных оценок положения равновесия необходимы алгоритмы с использованием данных реализации в течение небольшого промежутка времени, при которых процесс можно считать квазистационарным. Также необходимо, чтобы алгоритмы работали достаточно быстро.

2. Характеристики, получаемые при помощи статистической обработки реализаций качки, которые не всегда могут быть использованы непосредственно для определения равновесного положения. Например, среднее по процессу, обычно рассматриваемое в качестве оценки математического ожидания, не соответствует положению равновесия, особенно в случае существенно нелинейных и несимметричных колебаний. Из этого следует, что необходим некоторый алгоритм, использующий заранее полученные записи качки судна, который позволяет адекватно откорректировать среднее значение, приближая его к истинному значению равновесия.

3. Обработка записанного цифрового сигнала после регистрации процесса колебаний судна на волнении. Одной из простейших характеристик, которую можно оценить с высокой степенью надежности, является математическое ожидание процесса. Исходя из предположения о его стационарности и эргодичности, т. е. возможности замены обработки набора реализаций в момент времени t обработкой одной достаточно продолжительной временной реализации, можно получить среднее значение процесса, которое, однако, не обязательно будет соответствовать положению равновесия. Для объяснения этого рассмотрим общую математическую модель изолированной качки судна:

$$\ddot{X} + M_d(\dot{X}) + M_r(X) = M(t), \quad (1)$$

где M_d — сила / момент демпфирования; M_r — восстанавливающая сила / момент, M — возмущающая сила/момент.

Применим к правой и левой частям уравнения операцию математического ожидания (E):

$$E[\ddot{X} + M_d(\dot{X}) + M_r(X)] = E[\ddot{X}] + E[M_d(\dot{X})] + E[M_r(X)] = E[M_r(X)]. \quad (2)$$

Первые два слагаемых в левой части выражения (2) оказываются равными нулю, так как если бы они были ненулевыми, то судно совершало бы не колебательные движения, а равномерные или равноускоренные. При этом $E[M(t)] = 0$. Отсюда можно записать

$$E[M_r(X)] = 0. \quad (3)$$

Получается, что равновесное и среднее значения будут совпадать лишь для линейного варианта. Для проверки данного утверждения аппроксимируем возмущающий момент бортовой качки полиномом пятой степени:

$$M_r(\theta) = a(\theta - \theta_0) + b(\theta - \theta_0)^3 + c(\theta - \theta_0)^5, \quad (4)$$

где θ_0 — равновесный угол крена.

Данная аппроксимация позволяет учесть наличие максимума, угла заката и S-образность диаграммы статической остойчивости. Тогда с учетом выражения (3) можно записать

$$aE[\theta] - a\theta_0 + bE[(\theta - \theta_0)^3] + cE[(\theta - \theta_0)^5] = 0 \quad (5)$$

и, следовательно,

$$\theta_0 = E[\theta] + \frac{b}{a}E[(\theta - \theta_0)^3] + \frac{c}{a}E[(\theta - \theta_0)^5]. \quad (6)$$

При несимметричных колебаниях, которые чаще всего присутствуют в нелинейном случае, относительно положения равновесия статистические моменты во втором и третьем слагаемых не будут равны нулю. Тогда равновесное значение крена не равно среднему по процессу. Вычис-

лечь данную поправку теоретически не представляется возможным, что заставляет искать приближенные пути оценки равновесного значения. Именно такая процедура предложена в алгоритме Ю. И. Нечаева [7]. Базовая структура этого алгоритма, построенная на основе данных математического моделирования динамики взаимодействия надводных и подводных объектов с внешней средой, отражает физические закономерности процессов колебательного движения аварийного судна при бортовой, килевой и вертикальной качке. Отработка эффективности алгоритма проверялась в процессе натурных испытаний [8], а его адекватность — путем сопоставления с данными экспериментальных исследований поведения радиоуправляемых моделей морских судов на естественном волнении.

Рассмотрим алгоритм, представив его в следующем стандартном виде:

$$X_0 = \bar{X} \left[1 + (AX_m + BX_m^2) \frac{X''_{\max} - |X''_{\min}|}{X''_{\max} + |X''_{\min}|} \right]. \quad (7)$$

Здесь X_0 — отклонение судна от положения равновесия (угол); $\bar{X}$ — среднее значение отклонения; $X_m = |X_{\max}| + |X_{\min}|$ — средний размах отклонения; X'' — угловое ускорение; A и B — коэффициенты, которые необходимо определить для каждого судна путем моделирования.

Угол, угловую скорость и угловое ускорение измеряют по трем осям. Формула (7) записана только для одной оси, поэтому коэффициенты вычисляются для каждой оси отдельно. Смещение положения равновесного значения относительно нулевой линии рассматриваемого процесса может происходить в разные стороны, что учитывается знаками коэффициентов A и B .

Перепишем формулу (7) в более компактной форме:

$$X_0 = \bar{X} \left[1 + F_1(X_m) F_2(X''_{\min}, X''_{\max}) \right]. \quad (8)$$

Здесь $F_1(X_m)$ — функция идентификации, учитывающая особенности судна в процессе «настройки» модели взаимодействия; X_m — средний размах колебаний; $F_2(X''_{\min}, X''_{\max})$ — функция интерпретации, позволяющая выделять «скрытые» эффекты в зависимости от особенностей колебательного движения судна при линейной и нелинейной качке.

Функция $F_1(X_m)$ представляет собой некоторую нелинейную адаптивную модель, которая обеспечивающую идентификацию алгоритма применительно к определенному судну:

$$F_1(X_m) = AX_m + BX_m^2. \quad (9)$$

Коэффициенты A и B в данной функции получаются в процессе математического и/или физического моделирования взаимодействия судна с внешней средой. В дальнейшем будет показано как вычисляются данные коэффициенты с помощью имитационного моделирования в программном комплексе «Виртуальный полигон». Функцию $F_1(X_m)$ можно интерпретировать в следующем виде: в случае идентичности динамики исследуемого и некоторого базового судна коэффициенты A и B сохраняются и соответствуют заданному классу судна.

При этом функция $F_2(X''_{\min}, X''_{\max})$ характеризует основные физические эффекты и закономерности динамики сложной системы, которые зависят от особенностей восприятия динамических нагрузок при качке судна на нерегулярном волнении. Некоторая стандартная модель преобразования информации на основе этой функции имеет следующий вид:

$$F_2(X''_{\max}, X''_{\min}) = \frac{X''_{\max} - |X''_{\min}|}{X''_{\max} + |X''_{\min}|}, \quad (10)$$

где $X''_{\min}$, $X''_{\max}$ — это ускорения, получаемые в результате обработки измерительной информации.

При расчете смещения области равновесных значений учитываются особенностей асимметричной качки. Знаки коэффициентов будут определяться следующим образом:

– при бортовой качке знаку «плюс» соответствует смещение области средних значений на правый борт, а знаку «минус» — на левый борт;

- при килевой качке знаку «плюс» соответствует смещение области средних значений в носовую оконечность, а знаку «минус» — в корму;
- при вертикальной качке знаку «плюс» соответствует смещение области средних значений вверх от равновесного значения, а знаку «минус» — вниз.

На рис. 1 [1] приведена блок-схема алгоритма. Можно сделать вывод о том, что задача сводится к тому, что необходимо реализовать алгоритм Нечаева в программном комплексе — виртуальном полигоне. В данной задаче виртуальный полигон используется как для определения коэффициентов A и B в уравнении (7) для различных моделей судов, так и напрямую для моделирования качки судна с помощью имитационного моделирования.

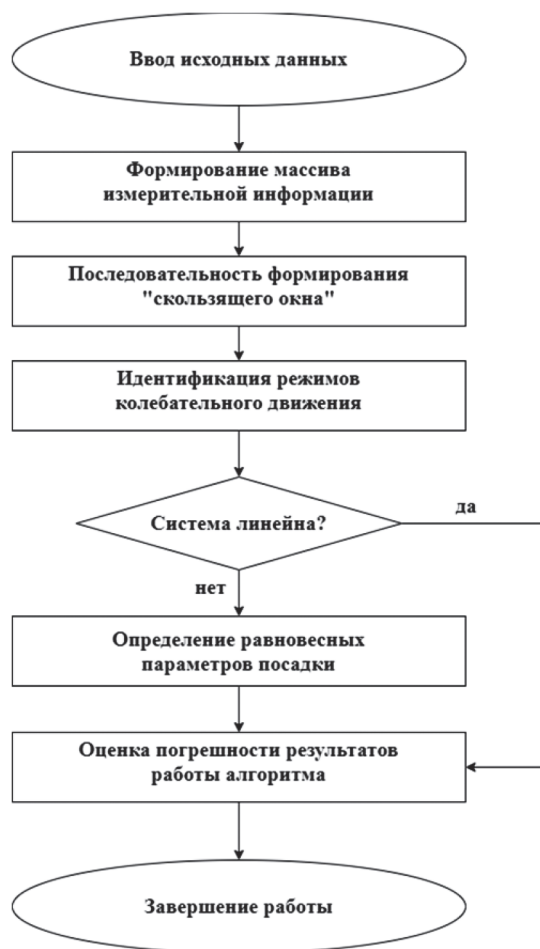


Рис. 1. Блок-схема алгоритма Ю. И. Нечаева

Для определения коэффициентов в программу загружается трехмерная модель судна, затем программа моделирует качку этого судна на разных режимах морского волнения (высота, направление волн, количество волновых систем, бортовая и килевая качка и их комбинация). Для каждого режима по полученным данным вычисляются все величины из уравнения (7) и методом наименьших квадратов — значения коэффициентов A и B . В данном случае вместо показаний датчиков используются параметры, полученные из программы напрямую, а значит, они настолько точны, насколько позволяет математическая модель и точность компьютера.

Для получения данных были использованы модели двух судов: «Аврора» и «Диоген» (рис. 2), которые были взяты из файлов в формате BSP, заимствованных из базы данных Vessel Санкт-Петербургского государственного университета [9]. Данный файл поддерживается с помощью пакета Hull [10], с помощью которого можно редактировать корпус судна и вычислять некоторые гидростатические характеристики. Параметры судов приведены в табл. 1.

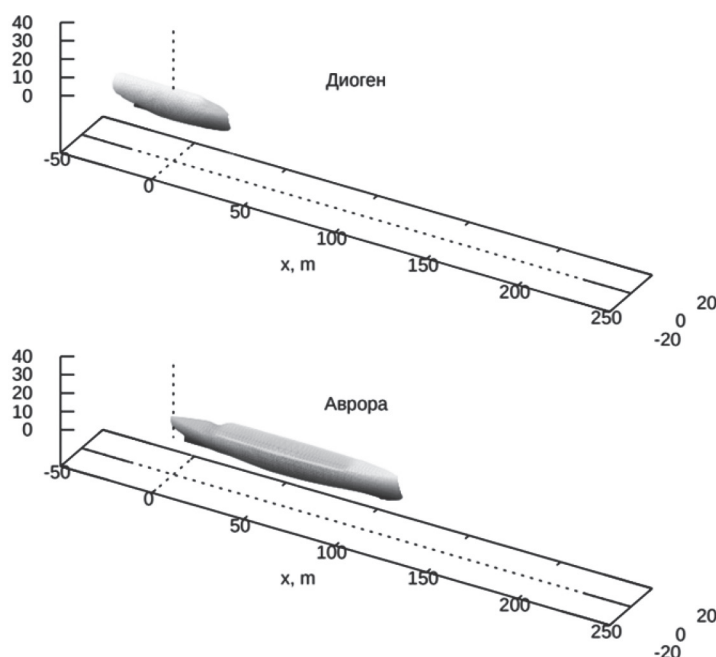


Рис. 2. Трехмерные модели корпусов судов «Диоген» и «Аврора»

Для судов на рис. 2, помимо крейсерского положения, были рассмотрены следующие случаи:

1. Несимметричная диаграмма поперечной статической остойчивости при симметричной продольной
2. Несимметричная диаграмма продольной статической остойчивости при симметричной поперечной.
3. Для судна «Диоген», помимо крейсерского положения, был рассмотрен случай одновременной несимметричности диаграмм продольной и поперечной статической остойчивости.

Таблица 1

Параметры корпуса судов, используемые при тестировании»

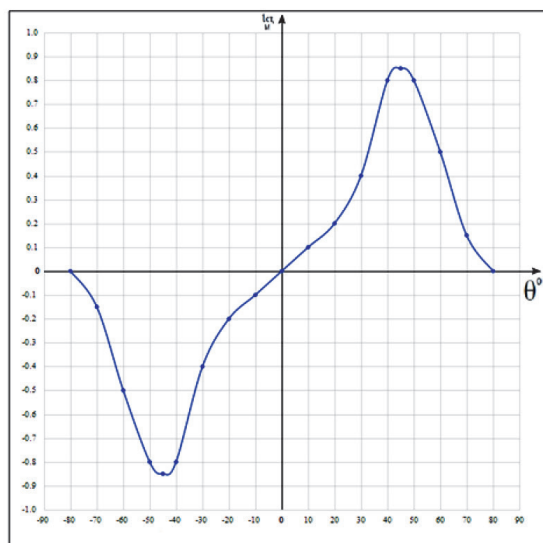
Параметры	«Диоген»	«Аврора»
Длина, м	60	126,5
Ширина, м	15	16,8
Высота, м	15	14,5
Количество панелей	4346	6335

Для моделирования различных аварийных ситуаций для данных моделей судов были также получены модели, центр тяжести которых был сдвинут на определенный вектор. Таким образом, были получены случаи с несимметричными диаграммами статической остойчивости. Примеры диаграмм статической остойчивости, полученных в виртуальном полигоне и используемых в дальнейшей работе алгоритма, приведены на рис. 3.

В программном комплексе «Виртуальный полигон» можно проводить симуляции с различными параметрами. Одним из таких параметров является вид для моделирования волн. Помимо базового подхода, такого как линейные модели волн, использовались также нелинейные модели, применяемые обычно для моделирования реальных волн с конечной амплитудой. В реальности волны отличаются от синусоиды, у них более крутые гребни и более пологие впадины. Такие волны, полученные в виде трохойды, уравнения которых имеют параметрическую форму [11], приближенно могут быть представлены в следующем виде:

$$z_w(x, t) = r \left(\sin(kx - \omega t) + \frac{\pi r}{\lambda} \cdot \cos(2(kx - \omega t)) \right). \quad (11)$$

а)



б)

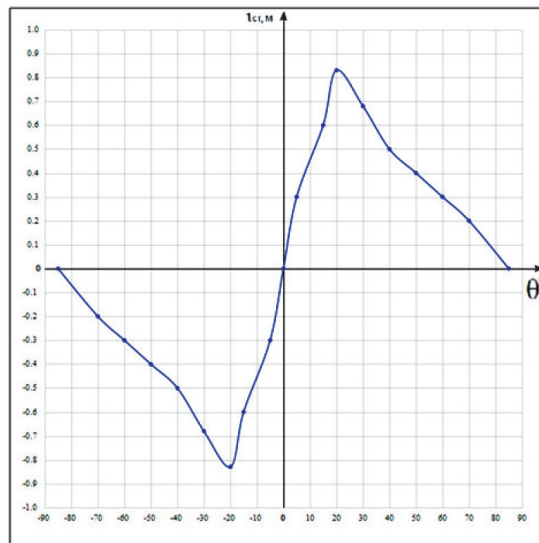


Рис. 3. Диаграммы поперечной статической остойчивости (а) и продольной статической остойчивости (б) для «Авроры» в крейсерском положении

Также существуют и другие модели, такие как модель Стокса [12], в которой наблюдается зависимость скорости от крутизны волны и малое перемещение частиц жидкости вблизи поверхности по направлению бега волн. При этом необходимо отметить, что для волн Стокса и распространяющейся косинусной волны в виртуальном полигоне используется один и тот же солвер внешних возмущений, а для модели волн Герстнера — другой.

Для дальнейшей работы алгоритма необходимо было собрать данные для базы знаний, которые были получены с помощью скрипта, использующего программный интерфейс виртуального полигона на языке Guile [13]. Этот интерфейс позволяет последовательно запускать симуляции в виртуальном полигоне с нужными параметрами и на необходимое время. Каждая симуляция запускалась на 2 мин с различными параметрами для каждой из трех представленных на рис. 2 трехмерных моделей судов.

Для каждой симуляции устанавливались следующие параметры:

- амплитуда волн задавалась в трех позициях: 0,5 м, 1 м, и 1,5 м;
- направление волн — в диапазоне от 0 до 2π с шагом $0,5\pi$.

Также для каждого из судов, представленных на рис. 2, была проведена симуляция при ровной волновой поверхности для получения некоторого представления о положении равновесия. Все симуляции выполнялись в течение двух минут с записью показания датчиков из виртуального полигона каждые 0,1 с. Таким образом были получены двенадцать различных синхронных записей параметров качки судна. Для каждой симуляции каждые 0,1 с выполнялась запись в файл следующих параметров: текущего момента времени внутри виртуального полигона; декартовых координат судна 70 ; углов поворота судна вокруг осей x , y , z ; объема подводной части судна; объема надводной части судна; скорости по осям x , y , z ; угловой скорости по осям x , y , z ; ускорения по осям x , y , z ; углового ускорения по осям x , y , z ; периода волны; длины волны по осям x , y ; частоты волны; волнового числа по осям x , y ; высоты волны, определенной по оси t ; высоты волны, определенной по осям x , y ; подъема взволнованной поверхности; углового момента по осям x , y , z ; периода волны, полученного из солвера внешних возмущений; длины волны по осям x , y , полученной из солвера внешних возмущений; частоты волны, полученной из солвера внешних возмущений; волнового числа по осям x , y , полученным из солвера внешних возмущений; высоты волны, полученной из солвера внешних возмущений; углов поворота судна вокруг осей x , y , полученных из солвера внешних возмущений.

Поскольку каждая симуляция длится ровно две минуты, в каждом выходном файле содержится 1200 экз. параметров, представленных ранее. В названии выходного файла отражено, какие из этих параметров были использованы при моделировании и какие действия необходимы для их дальнейшего анализа.

Результаты (Results)

Для вычисления коэффициентов A и B в алгоритме Ю. И. Нечаева перепишем формулу (7) в следующем виде:

$$f(X) = A\varphi_1(X) + B\varphi_2(X). \quad (12)$$

$$\text{Здесь } f(X) = X_0 - \bar{X}; \quad \varphi_1(X) = \bar{X}X_m \frac{|X_{\max}''| - |X_{\min}''|}{|X_{\max}''| + |X_{\min}''|}; \quad \varphi_2(X) = \bar{X}X_m \frac{|X_{\max}''| - |X_{\min}''|}{|X_{\max}''| + |X_{\min}''|}.$$

В данном случае X характеризует состояние системы «судно + внешняя среда».

Используя формулу (12), составим систему из n уравнений, в данном случае их двенадцать, выбрав различные параметры, которые были применены при моделировании:

$$f(X_k) = A\varphi_1(X_k) + B\varphi_2(X_k), k = \overline{1, 12}. \quad (13)$$

Получим переопределенную систему, для которой не существует классического решения.

Воспользовавшись методом наименьших квадратов (МНК), запишем невязку:

$$r_k = A\varphi_1(X_k) + B\varphi_2(X_k) - f(X_k). \quad (14)$$

Далее введем функцию, равную сумме квадратов невязок:

$$\Phi(A, B) = \sum_{k=1}^{12} r_k^2 = \sum_{k=1}^{12} (A\varphi_1(X_k) + B\varphi_2(X_k) - f(X_k))^2. \quad (15)$$

Необходимо решить задачу минимизации [10] (24), т. е. найти такие A и B , при которых $\text{grad}\Phi(A, B) = \bar{0}$. Выразим частные производные:

$$\frac{\partial \Phi}{\partial A} = 2 \sum_{k=1}^{12} \varphi_1(X_k) [A\varphi_1(X_k) + B\varphi_2(X_k) - f(X_k)] = 0; \quad (16)$$

$$\frac{\partial \Phi}{\partial B} = 2 \sum_{k=1}^{12} \varphi_2(X_k) [A\varphi_1(X_k) + B\varphi_2(X_k) - f(X_k)] = 0. \quad (17)$$

Получим следующую систему:

$$\begin{cases} A \sum_{k=1}^{12} \varphi_1^2(X_k) + B \sum_{k=1}^{12} \varphi_1(X_k) \varphi_2(X_k) = \sum_{k=1}^{12} \varphi_1(X_k) f(X_k); \\ A \sum_{k=1}^{12} \varphi_2(X_k) \varphi_1(X_k) + B \sum_{k=1}^{12} \varphi_2^2(X_k) = \sum_{k=1}^{12} \varphi_2(X_k) f(X_k). \end{cases} \quad (18)$$

Преобразуем полученную систему:

$$\begin{cases} A(\varphi_1 \varphi_1) + B(\varphi_1 \varphi_2) = (\varphi_1 f); \\ A(\varphi_1 \varphi_2) + B(\varphi_2 \varphi_2) = (\varphi_2 f), \end{cases} \quad (19)$$

$$\text{где } (gh) = \sum_{k=1}^{12} g(X_k) h(X_k).$$

Матрица системы (19) называется *матрицей Грама* [14]. Из нее можно выразить искомые A и B с помощью итерационного метода Гаусса. Кроме того, необходимо помнить, что угол,

угловую скорость и угловое ускорение измеряют по трем осям. Данная формула записана только для одной оси, поэтому коэффициенты необходимо вычислить для каждой оси отдельно.

Как видно из табл. 2, полученные коэффициенты при различных типах волнения отличались в рамках погрешности, как и полученные значения равновесия, из чего можно сделать вывод, что выбор модели волнения не сильно влияет на результат применения алгоритма Нечаева. В таблице отражены только полученные коэффициенты для «Авроры» в крейсерском положении, для остальных случаев результаты получились аналогичные.

Таблица 2

Коэффициенты в формуле Ю. И. Нечаева для модели судна «Аврора»

«Аврора» и линейные волны		
	A	B
Бортовая качка	0,046	0,02
Килевая качка	0,042	0,025
Вертикальная качка	0,040	0
«Аврора» и волны Стокса		
	A	B
Бортовая качка	0,041	0,017
Килевая качка	0,049	0,027
Вертикальная качка	0,035	0
«Аврора» и волны Герстнера		
	A	B
Бортовая качка	0,044	0,019
Килевая качка	0,046	0,028
Вертикальная качка	0,042	0

Кроме того, было проведено сравнение времени, необходимого для генерации симуляции продолжительностью 120 с. Модели линейных волн и волн Стокса для реализации программы «Виртуальный полигон» используют один и тот же солвер внешних возмущений, поэтому периоды времени, затраченные на генерацию данных симуляций, были очень близки. При этом время, затрачиваемое на симуляцию при использовании волн Стокса, увеличивалось примерно в 1,5 раза.

Заключение (Conclusion)

На основе проведенного исследования можно сделать вывод, что с помощью алгоритма Ю. И. Нечаева можно корректно определять равновесное положение судна в море во время морского волнения. В рамках работы предложена реализация алгоритма с использованием имитационного моделирования в программном комплексе «Виртуальный полигон». На основе выполненного сравнения результатов работы реализации алгоритма с различными моделями морского волнения можно заметить, что усложнение модели волн, используемой для получения коэффициентов в алгоритме Ю. И. Нечаева, незначительно изменяет полученное значение равновесного параметра, однако при этом достаточно значительно увеличивается время, затраченное на генерацию одной симуляции, если при использовании линейных волн или волн Стокса генерация двух минут симуляции происходит быстрее чем за две минуты реального времени, то при использовании волн Герстнера время симуляции приближается к трем минутам реального времени, что уже превышает время симуляции. Кроме того, при использовании модели волн Стокса можно получить более приближенные результаты к модели Герстнера, чем при использовании модели линейных волн, не затрачивая при этом дополнительное время. Таким образом, данный режим использования можно признать оптимальным.

В перспективе можно рассматривать два дальнейших направления деятельности. Во-первых, в рассмотренных ранее вариантах реализации алгоритма Нечаева учитывалось только влияния волн на судно, а также сравнивались результаты при применении различных моделей волнения, однако при этом не учитывалось влияние на судно в море других факторов, например, ветра. Интерес представляет исследование влияния различных моделей ветра в комбинации с различ-

ными моделями морского волнения, а также сравнение полученных результатов для коэффициентов A и B . Во-вторых, необходимо учитывать обледенение, так как опасности, оно представляет для судов в открытом море при экстремальных погодных условиях, представляют собой большую угрозу для современного судоходства. При этом главной проблемой является изменение общего центра масс и центра тяжести судна вместе с накопившимся льдом. В [15] доказано, что новая метacentрическая высота всегда будет меньше исходной без обледенения.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Бордюг А. С. Методы распознавания данных при плавании судов / А. С. Бордюг // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2020. — Т. 12. — № 6. — С. 1029–1038. DOI: 10.21821/2309-5180-2020-12-6-1029-1038.
2. Ершов А. А. Оценка эффективности использования перекачки балласта для предотвращения повреждения корпуса судна в ледовых условиях / А. А. Ершов, П. И. Петухов // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2021. — Т. 13. — № 3. — С. 316–324. DOI: 10.21821/2309-5180-2021-13-3-316-324.
3. Мазуренко О. И. Моделирование тылового грузового фронта морского угольного терминала / О. И. Мазуренко, И. А. Русинов // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2021. — Т. 13. — № 5. — С. 636–650. DOI: 10.21821/2309-5180-2021-13-5-636-650.
4. Киселев В. С. Имитационное моделирование работы шельфовых сооружений с танкерами-челноками при отгрузке нефтепродуктов в условиях Крайнего Севера / В. С. Киселев // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2020. — Т. 12. — № 1. — С. 46–56. DOI: 10.21821/2309-5180-2020-12-1-46-56.
5. Gavrikov A. Virtual testbed: simulation of air flow around ship hull and its effect on ship motions / A. Gavrikov, A. Degtyarev, D. Egorov, I. Gankevich, A. Grigorev, V. Khramushin, I. Petriakov // International Conference on Computational Science and Its Applications. — Springer, Cham, 2020. — Pp. 18–28. DOI: 10.1007/978-3-030-58817-5_2.
6. Petriakov I. Virtual Testbed: Simulation of Ocean Wave Reflection from the Ship Hull / I. Petriakov, A. Degtyarev, D. Egorov, I. Gankevich, A. Gavrikov, A. Grigorev, V. Khramushin // International Conference on Computational Science and Its Applications. — Springer, Cham, 2020. — Pp. 29–39. DOI: 10.1007/978-3-030-58817-5_3.
7. Пат. 2518374 Российская Федерация, МПК В63В 39/14, В63В 43/00, G05D 1/00. Способ контроля непотопляемости судна / Ю. И. Нечаев; заяв. и патентообл. Нечаев Юрий Иванович. — № 2013107403/11; заявл. 19.02.2013; опубл. 10.06.2014, Бюл. № 16. — 8 с.
8. Нечаев Ю.И. Интеллектуальная система контроля непотопляемости судна / Ю.И. Нечаев, О.П. Анищенко, И.А. Кирюхин // Системы искусственного интеллекта в интеллектуальных технологиях XXI века. — Санкт-Петербург: Арт-Экспресс, 2011. — С. 83–98.
9. База данных 2015621368 Российская Федерация. Проектные чертежи для анализа гидростатических характеристик, остойчивости и ходкости корабля (Vessel) / А. В. Богданов, В. Н. Храмушин; заяв. и патентообл. Санкт-Петербургский государственный университет. — № 2015620664; заявл. 05.06.2015; опубл. 20.10.2015.
10. Программа для ЭВМ 2010615849 Российская Федерация. Hull / В. Н. Храмушин; заяв. и патентообл. Сахалинский государственный университет. — № 2010614190; заявл. 13.07.2010; опубл. 08.09.2010.
11. Coons S. A. Surfaces for computer-aided design of space forms. Technical Report MIT/LCS/TR-41 / S. A. Coons. — USA: Massachusetts Institute of Technology, 1967. — 106 p.
12. Stokes G.G. On the Theory of Oscillatory Waves / G.G. Stokes // Mathematical and Physical Papers. — Cambridge University Press, 2009. — Pp. 197–229. DOI: 10.1017/CBO9780511702242.013.
13. GNU's programming and extension language [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <https://www.gnu.org/software/guile/> (дата обращения 23.04.2022).
14. Глава 17. Стационарные случайные функции [Электронный ресурс]. — Режим доступа: https://scask.ru/a_book_tp.php?id=95 (дата обращения 20.02.2021).
15. Kobylinski L. Safety of Ships in Icing Conditions / L. Kobylinski // Proceedings of the 12th International Conference on the Stability of Ships and Ocean Vehicles. — UK, Glasgow: Department of Naval Architecture and Marine Engineering, University of Strathclyde, 2015. — Pp. 239–248.

REFERENCES

1. Bordyug, Aleksandr S. "Methods of data recognition during ships navigation." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 12.6 (2020): 1029–1038. DOI: 10.21821/2309-5180-2020-12-6-1029-1038.
2. Ershov, Andrey A., and Pavel I. Petukhov. "Evaluation of the efficiency of using ballast pumping to prevent damage to the ship's hull in ice conditions." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 13.3 (2021): 316–324. DOI: 10.21821/2309-5180-2021-13-3-316-324.
3. Mazurenko, Olga I., and Igor A. Rusinov. "Simulation modeling of the rear cargo fronts of marine coal terminals." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 13.5 (2021): 636–650. DOI: 10.21821/2309-5180-2021-13-5-636-650.
4. Kiselev, Vadim S. "Simulation of the work of shelf constructions with shuttle tankers during shipping of oil products in the far north conditions." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 12.1 (2020): 46–56. DOI: 10.21821/2309-5180-2020-12-1-46-56.
5. Gavrikov, Anton, Alexander Degtyarev, Denis Egorov, Ivan Gankevich, Artemii Grigorev, Vasily Khramushin, and Ivan Petriakov. "Virtual testbed: simulation of air flow around ship hull and its effect on ship motions." *International Conference on Computational Science and Its Applications*. Springer, Cham, 2020. 18–28. DOI: 10.1007/978-3-030-58817-5_2.
6. Petriakov, Ivan, Alexander Degtyarev, Denis Egorov, Ivan Gankevich, Anton Gavrikov, Artemii Grigorev, and Vasily Khramushin. "Virtual Testbed: Simulation of Ocean Wave Reflection from the Ship Hull." *International Conference on Computational Science and Its Applications*. Springer, Cham, 2020. 29–39. DOI: 10.1007/978-3-030-58817-5_3.
7. Nechaev, Jurij I. RU 2 518 374 C1, IPC B63B 39/14, B63B 43/00, G05D 1/00. Method for monitoring vessel insubmersibility. Russian Federation, assignee. Publ. 10 June 2014.
8. Nechaev, Yu. I., O. P. Anishchenko, and I. A. Kiryukhin. "Intellectual'naya sistema kontrolya nepotoplyaemosti sudna." *Sistemy iskusstvennogo intellekta v intellektual'nykh tekhnologiyakh XXI veka*. Sankt-Peterburg: Art-Ekspres, 2011. 83–98.
9. Bogdanov, A. V., and V. N. Khramushin. Database RU 2015621368. Proektnye chertezhi dlya analiza gidro-staticheskikh kharakteristik, ostoichivosti i khodkosti korablya (Vessel). Russian Federation, assignee. Publ. 20 Oct. 2015.
10. Khramushin, V.N. Computer program RU 2010615849. Hull. Russian Federation, assignee. Publ. 8 Sept. 2010.
11. Coons, Steven A. *Surfaces for computer-aided design of space forms*. Technical Report MIT/LCS/TR-41. USA: Massachusetts Institute of Technology, 1967.
12. Stokes, George Gabriel. "On the Theory of Oscillatory Waves." *Mathematical and Physical Papers*. Cambridge University Press, 2009. 197–229. DOI: 10.1017/CBO9780511702242.013.
13. GNU's programming and extension language. Web. 23 Apr. 2022 <<https://www.gnu.org/software/guile/>>.
14. Glava 17. Statsionarnye sluchainye funktsii. Web. 20 Feb. 2021 <https://scask.ru/a_book_tp.php?id=95>.
15. Kobylinski, Lech. "Safety of Ships in Icing Conditions." *Proceedings of the 12th International Conference on the Stability of Ships and Ocean Vehicles*. UK, Glasgow: Department of Naval Architecture and Marine Engineering, University of Strathclyde, 2015. 239–248.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Егоров Денис Александрович — ассистент
ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени адмирала
С. О. Макарова»
198035, Российская Федерация, Санкт-Петербург,
ул. Двинская, 5/7
e-mail: egorovda@gumrf.ru
Ганкевич Иван Геннадьевич —
кандидат физико-математических наук, доцент
Санкт-Петербургский государственный
университет
199034, Российская Федерация, Санкт-Петербург,
Университетская набережная, д. 7–9
e-mail: i.gankevich@spbu.ru

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Egorov, Denis A. — Assistant
Admiral Makarov State University of Maritime
and Inland Shipping
5/7 Dvinskaya Str., St. Petersburg, 198035,
Russian Federation
e-mail: egorovda@gumrf.ru
Gankevich, Ivan G. —
PhD, associate professor
St. Petersburg University
7-9 Universitetskaya Embankment,
St. Petersburg, 199034,
Russian Federation
e-mail: i.gankevich@spbu.ru

Дегтярев Александр Борисович —
доктор технических наук, профессор
Санкт-Петербургский государственный
университет
199034, Российская Федерация, Санкт-Петербург,
Университетская набережная, д. 7–9
e-mail: a.degtyarev@spbu.ru

Degtyarev, Aleksandr B. —
Dr. of Technical Sciences, professor
St. Petersburg University
7-9 Universitetskaya Embankment,
St. Petersburg, 199034,
Russian Federation
e-mail: a.degtyarev@spbu.ru

Статья поступила в редакцию 9 июня 2022 г.

Received: June 9, 2022.