

УДК656.052.4:656.052.7

DOI: 10.34046/aumsuomt101/12

## ИССЛЕДОВАНИЕ УПРАВЛЕНИЯ ДВИЖЕНИЕМ СУДНА ПО ОТКЛОНЕНИЯМ В УСЛОВИЯХ ВЕТРО-ВОЛНОВОЙ НАГРУЗКИ

*Ю.И. Юдин, доктор технических наук, профессор*

*В.В. Перевозов, капитан*

В статье представлены результаты исследований возможности использования инновационного способа управления движением судна по отклонениям в реальных условиях плавания, т.е. при наличии ветро-волновых нагрузок. Данные исследования являются частью технического проекта по разработке перспективных способов и методов управления движением судна с использованием интеллектуальных технологий, которые могут быть положены в основу создания автоматизированных систем управления движением судна. Автоматизированные системы управления движением судна могут быть использованы при выполнении ключевых судовых операций, в частности, швартовочной операции судна к борту другого судна, стоящего на якоре, дрейфующего или движущегося заданным курсом.

**Ключевые слова:** управление по отклонениям, ветер, волнение, моделирование, движение судна.

## INVESTIGATION OF SHIP MOTION CONTROL BY DEVIATIONS IN CONDITIONS OF WIND-WAVE LOAD

*Yu.I. Yudin, V.V. Perevozov*

The article presents the results of studies on the possibility of using an innovative method of controlling the movement of a vessel by deviations in real navigation conditions, i.e. in the presence of wind-wave loads. These studies are part of a technical project for the development of promising methods and methods for controlling the movement of the vessel using intelligent technologies, which can be used as the basis for the creation of automated control systems for the movement of the vessel. Automated ship traffic control systems can be used when performing key ship operations, in particular, mooring operations of a ship to the side of another ship at anchor, drifting or moving on a given course.

**Key words:** deviation control, wind, waves, modeling, ship movement.

### Введение

В статье «Моделирование движения судна при различных способах управления им в процессе выполнения швартовочной операции» [6], публикуемой в данном номере журнала представлены материалы анализа результатов моделирования процесса движения швартуемого судна (далее по тексту слово швартуемое опущено), управляемого с использованием инновационного способа управления по отклонениям, подробно описанного в изобретениях [1], [2], [3]. В указанной статье рассматривается движение судна без учёта влияния внешних факторов (ветер, волнение) на управление движением по отклонениям, т.е. в условиях тихой воды. Тем не менее, представляет определённый интерес управление по отклонениям при выполнении швартовочной операции в условиях ветро-волновых воздействий, которые сопровождают любую швартовку в открытом море. С целью оценки возможности использования упомянутого выше способа управления движением судна в условиях ветро-волновых воздействий выполнено ряд модельных экспериментов, результаты которых публикуются в данной статье. При этом методика расчёта аэродинамических усилий заимствована из материалов статьи [7], а волновое воздействие определялось в соответствии с методикой, подробно изложенной в

статьях [5], [8]. В качестве математической модели судна использована модель контейнеровоза проекта ARCTICCONTAINERSHIPACS 650 [9].

### Влияние ветра на систему управления по отклонениям

Представим результаты моделирования движения судна в условиях ветровой нагрузки, выбрав для этого способ 1 формирования заданной линии (ЗЛ) [6]. При этом заданная точка (ЗТ) находится далеко от начального положения судна, ЗЛ направлена точно на центр тяжести (ЦТ) судна. Усложним ситуацию параллельным перемещением ЗЛ. В отсутствие ветра траектория судна в этом случае показана на рисунке 1 – система управления сразу «захватывает» ПЛ и движется вдоль нее всё остальное время моделирования.

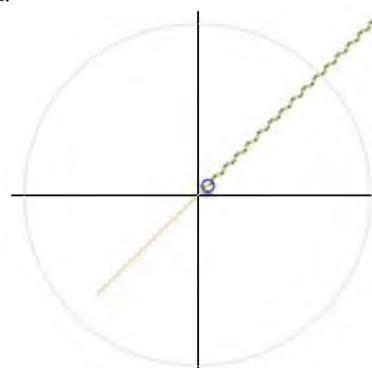


Рисунок 1 – Кадр компьютерной программы для моделирования манёвров судна

Будем теперь менять направление ветра. Имеющего скорость  $v_a = 15$  м/с. Начальный курс судна  $\psi_0 = 60^\circ$ , поэтому моделируем действие ветра с четырёх направлений. Это встречный ( $q_a = 60^\circ$ ), попутный ветер ( $q_a = 240^\circ$ ) и боковые траверсные ветры правого ( $q_a = 150^\circ$ ) и левого бортов ( $q_a = 330^\circ$ ). Такое моделирование показало следующее – система управления и в этих случаях работает устойчиво, также происходит «захват» ЗЛ и дальнейшее движение вдоль неё. Введём начальное возмущение в виде углового отклонения ЗЛ, которая в момент начала моделирования не проходит через ЦТ судна, а имеет начальное угловое смещение, т.е., например, при начальном значении курса  $\psi_0 = 60^\circ$  исходное направление ЗЛ устанавливается равным  $62^\circ$  или  $58^\circ$ .

При таком начальном возмущении и действии ветра система управления изменяет свое поведение, относительно управления при отсутствии ветровой нагрузки. При попутном и встречном ветре система управления по отклонениям не теряет функциональности и траектории движения судна вдоль ЗЛ незначительно отличаются от аналогичных траекторий при отсутствии ветра (на рисунке 2 это траектория зелёного цвета, которая практически совпадает с траекторией чёрного цвета).

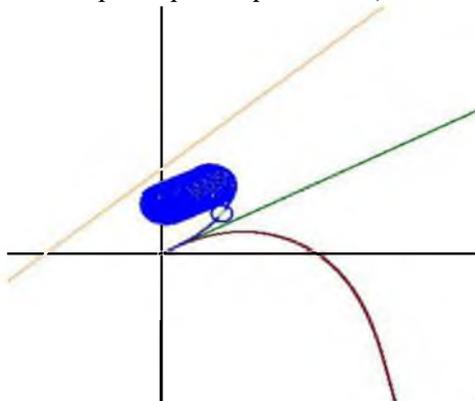


Рисунок 2 – Траектории движения судна вдоль ЗЛ при действии ветра  $v_a = 15$  м/с (с направления  $q_a = 60^\circ$  и  $q_a = 240^\circ$  – зелёная и чёрная, соответственно), ( $q_a = 150^\circ$  – синяя), ( $q_a = 330^\circ$  – коричневая)

При траверсных направлениях ветра система управления теряет устойчивость и в одном случае судно переходит в циклическую циркуляцию (траектория синего цвета, направление ветра  $q_a = 150^\circ$ ) или уходит в сторону от ЗЛ (траектория коричневого цвета, направление ветра  $q_a = 330^\circ$ ). При уменьшении ветровой нагрузки, т.е. снижении скорости ветра до  $v_a = 10$  м/с, при условии наличия начального возмущения по направлению ЗЛ, система управления восстанавливает работоспособность. Это показано на рисунке 3, где повторена траектория при потере устойчивости системы управления для скорости ветра  $v_a = 15$  м/с

(траектория синего цвета) и показана траектория устойчивого управления для  $v_a = 10$  м/с (траектория зелёного цвета). В этом случае ветер действует с траверсного направления, т.е.  $q_a = 150^\circ$ .

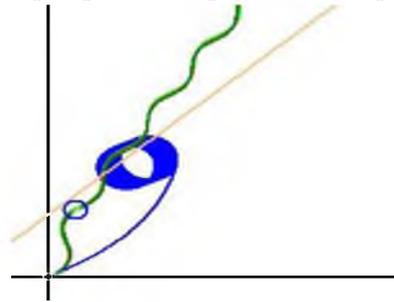


Рисунок 3 – Траектория неустойчивого управления (траектория синего цвета, ветер  $v_a = 15$  м/с) и устойчивого управления (траектория зелёного цвета, ветер  $v_a = 10$  м/с), в обоих случаях  $q_a = 150^\circ$

Практически это означает, что в реальных условиях следует выйти на ЗЛ, чтобы снять начальное возмущение, и лишь затем перейти на управление по отклонениям. Для большей информативности на рисунке 4 приведены результаты моделирования, связанные непосредственно с действием ветра: угол дрейфа  $\beta$ , курс судна  $\psi$ , продольная  $X_a$  и поперечная  $Y_a$  составляющие аэродинамической силы, действующей на корпус судна при его движении вдоль ЗЛ (траектория зелёного цвета). Хорошо видны циклические изменения указанных параметров, в соответствии с траекторией движения судна.

Можно сделать вывод, что система управления по отклонениям не вызывает каких-либо особенностей в поведении судна при движении в условиях ветровой нагрузки. Если сравнить значения критерия качества  $Q$  [6],

$$Q = \sqrt{\sum_k [d_{Fk}^2 + d_{Ak}^2]} \quad (1)$$

который определяет качество управления исключительно по отклонениям носовой ( $d_F$ ) и кормовой ( $d_A$ ) точек судна от ЗЛ, то они таковы:  $Q = 3.7139$  (в отсутствии ветра),  $Q = 3.6151$  (ветер встречный),  $Q = 3.9182$  (ветер попутный). Это говорит о том, что качество управления судном при его движении вдоль ЗЛ в условиях встречного ветра несколько выше качества управления в условиях отсутствия ветра ( $3.6151 < 3.7139$ ), в то время как качество управления судном, движущимся в условиях попутного ветра несколько хуже ( $3.7139 < 3.9182$ ). Это не противоречит общепринятой оценке управляемости судна при движении в условиях ветровой нагрузки, так как момент аэродинамической силы, при кормовом расположении надстройки на курсовых углах ветра близких к  $0^\circ$ , имеет положительные значения, т.е. способствует возвращению судна на ЗЛ.

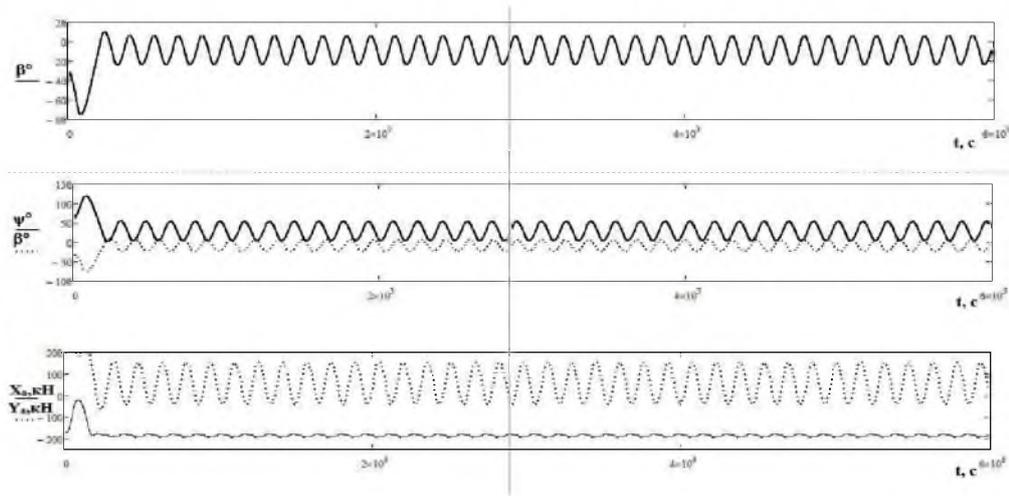


Рисунок 4 - Изменения во времени (с) угла дрейфа ( $^{\circ}$ ), курса судна ( $^{\circ}$ ) и ветровых усилий – продольного и поперечного (кН)

### Влияние волнения на систему управления по отклонениям

#### Регулярное волнение

При исследовании действия волнения в рамках моделирования движения судна под действием системы управления по отклонениям приходится варьировать рядом известных параметров волнения. Если речь идёт о регулярном волнении, то это высота волны  $h$  или балльность, её курсовой угол  $q_w$ , а также длина волны  $\lambda$ . Кроме того, следует варьировать и скорость судна, т.к. она существенно влияет на устойчивость движения. Как и в случае с ветром результаты моделирования движения судна при управлении им по отклонениям носовой ( $d_F$ ) и кормовой ( $d_A$ ) точек от ЗЛ будем представлять в графическом формате, наиболее информативном при своей лаконичности. ЗЛ задаём также, как и при моделировании движения судна в условиях ветровой нагрузки. Конкретно, в испытаниях ЗЛ имеет направление  $q_p = 45^{\circ}$ , она неподвижна, начальный курс судна  $\psi_0 = 60^{\circ}$ . Именно за счёт неравенства  $q_p \neq \psi_0$  образуются начальные отклонения, и, как следствие, начинает работать система управления по отклонениям. Если принять условие  $q_p = \psi_0$ , то траектория судна становится прямолинейной, а система управления вообще не вступает в работу. В аналогичном случае движения судна в условиях ветровой нагрузки, она является причиной начального возбуждения, и система управления работает обычным образом.

Первым испытанием при исследовании действия волнения является оценка реакции системы управления на изменение курсового угла волнения  $q_w$ . Всем судоводителям хорошо известно влияние курсового угла  $q_w$  волны на

управляемость судна. Нечто подобное происходит и в случае управления по отклонениям. На рисунке 5 показаны траектории судна при действии волнения в 4 балла с длиной волны  $\lambda = 60$  м с разных направлений. Если волнение действует с курсовых углов от  $q_w = 0^{\circ}$  до  $q_w = 60^{\circ}$ , система управления по отклонениям функционирует нормально и траектории движения судна меандрируют вокруг направления ЗЛ ( $q_p = 45^{\circ}$ ). При курсовом угле волны  $q_w = 65^{\circ}$  система не справляется с управлением, траектория (линия зелёного цвета) уходит от ЗЛ. То же происходит при действии волнения с левого борта под углом  $-65^{\circ}$  (линия коричневого цвета). Уход от ЗЛ в сторону на волнение при определённом соотношении курсового угла волны  $q_w$  и её длины  $\lambda$  возможен, так как редуцированные коэффициенты  $\chi_{1kr}$  и  $\chi_{2kr}$  [4], [8] могут иметь и отрицательные знаки, фактически судно автоматически минимизирует волновую нагрузку [8].

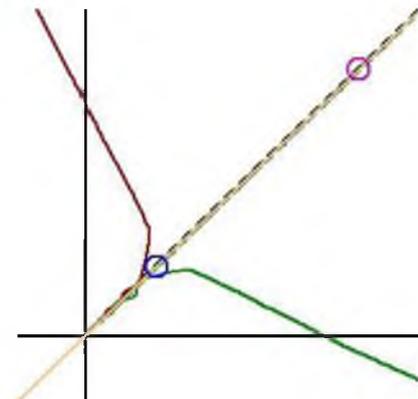


Рисунок 5 – Траектории управляемого судна при курсовом угле  $|q_w| < 60^{\circ}$  (движение вдоль ЗЛ) и  $q_w = \pm 65^{\circ}$  («+»зелёная линия/«-»коричневая линия).

Увеличение курсового угла  $q_w$  приводит к уходу судна от ЗЛ. В данном случае траектории

движения судна показаны на рисунке 6, на этих траекториях возможны даже циркуляционные движения (зелёная и чёрная линии). Однако, когда курсовой угол достигает значения  $q_w = 140^\circ$ , траектория из неуправляемой переходит в управляемую, в этом случае она показана коричневым цветом. На ней зарыскивания относительно ЗЛ больше, чем при встречном волнении  $q_w < 60^\circ$  (рисунок 5).

При дальнейшем увеличении курсового угла волны до  $180^\circ$  траектории остаются управляемыми и зарыскивания вдоль ЗЛ уменьшаются. Это связано, прежде всего, с уменьшением силового воздействия волнения и сменой его знака [8]. Информацию, представляемую на рисунках можно подкрепить и численными значениями критерия качества управления. Для этого мы выберем критерий  $Q$  (1), который связан непосредственно с отклонениями от ЗЛ в процессе управ-

ления. Значения  $Q$  приведены в таблице 1, из которых следует, что качество управления тем выше (соответствует меньшему значению  $Q$ ), чем курсовой угол волны ближе к направлению ЗЛ ( $0^\circ \leq q_w \leq 60^\circ$ ;  $140^\circ \leq q_w \leq 180^\circ$ ).

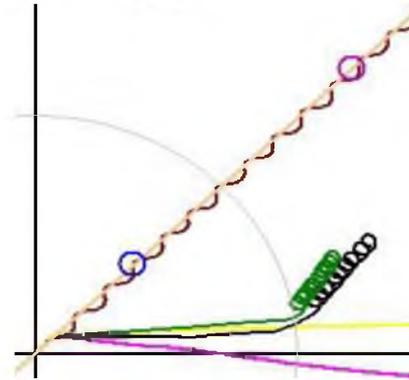


Рисунок 6 – Траектории управляемого судна при курсовом угле волнения от  $q_w > 65^\circ$  (траектории уходящие от ЗЛ) до  $q_w = 140^\circ$  (коричневая траектория вдоль ЗЛ)

Таблица 1

$q_w, ^\circ$	15	35	45	55	65	140	150	160	170
$Q$	1.3587	1.5766	1.6007	2.5560	4.1185	1.8027	1.6168	1.5516	1.4662

Балльность волнения сказывается на качестве управления ожидаемым образом – оно убывает при усилении волнения. Показатель  $Q$  подтверждает этот факт. Так для 4-х балльного волнения с курсовым углом  $q_w = 15^\circ$ , длиной волны  $\lambda = 60$  м,  $Q = 1.3587$  (таблица 1), при 5-ти балльном волнении – 1.5996, при 6-ти балльном –  $Q = 1.9188$ , при 8 балльном –  $Q = 3.5903$ .

Длина волны может влиять на поведение судна неожиданным образом. Дело в том, что всё зависит от комбинации длины волны  $\lambda$  и курсового угла  $q_w$ , т.е. от величины условного коэффициента  $\mu = (2\pi/\lambda) \times \cos(q_w)$  [8]. Поэтому при разных курсовых углах изменение длины волны сказывается по-разному. Коэффициенты редукции  $\chi_{1кр}$ ,  $\chi_{2кр}$  будут тем ближе к единице (это их максимум), чем меньше значение коэффициента  $\mu$ . Так при волнении в 4 балла, курсовом угле  $q_w = 15^\circ$  и длине волны  $\lambda = 30$  м коэффициент  $\mu = 0.2$  и влияние волнения не ощущается. Увеличение длины волны  $\lambda$  даёт следующие результаты по значению показателя качества управления  $Q$ : при  $\lambda = 60$  м – 1.3587, при  $\lambda = 90$  м – 1.3817, при  $\lambda = 120$  м – 1.2549, т.е. качество растёт. Однако при курсовом угле  $q_w = 35^\circ$  мы видим обратную картину: при  $\lambda = 60$  м – 1.5766, при  $\lambda = 90$  м – 1.7521, при  $\lambda = 120$  м – 1.9321, т.е. качество падает при том же росте длины волны.

Дополним эти данные информацией о силовых характеристиках движения судна. На рисунках 7-9 приведены такие характеристики. Так на рисунке 7 изображены поперечное усилие и момент от действия волнения с курсовым углом  $q_w = 35^\circ$  при временно́й протяжённости процесса маневрирования в 1000 с. Видны высокочастотные составляющие волновых воздействий, которые вызваны изменением коэффициента  $\mu$  из-за рыскания судна, приводящего к изменению курсового угла  $q_w$ . Изменение значения курсового угла  $q_w$  показано на нижней диаграмме рисунка 7.

На рисунке 8 приведены те же характеристики для  $q_w = 145^\circ$  ( $35^\circ$  с кормы). В принципе они носят такой же характер, что и на рисунке 7, только можно отметить более плавное изменение курсового угла  $q_w$ .

На рисунке 9 в дополнение показан характер изменения поперечной составляющей гидродинамической силы на корпусе судна  $Y_H$  (кН) и её момента  $M_H$  (кНм), а также тяги движителя  $T_e$ . При этом колебания тяги движителя  $T_e$  связаны с периодическим изменением скорости хода судна  $u$  (м/с), которое вызвано изменением угла дрейфа  $\beta$ , что приводит к изменению относительной поступи винта  $J [=u/(nD)]$ ;  $n$  – обороты винта, (1/с),  $D$  – диаметр винта, (м)].

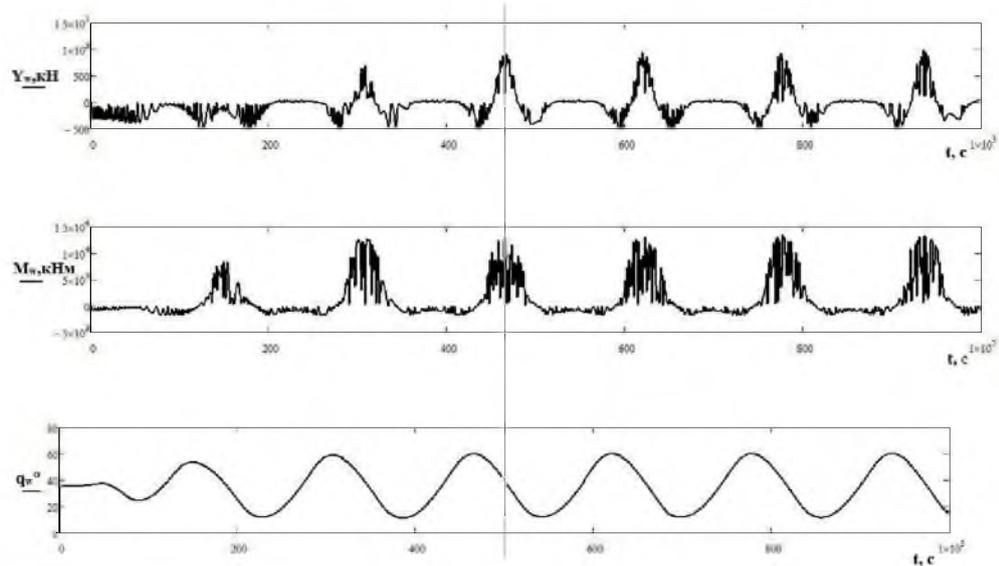


Рисунок 7 – Поперечное усилие  $Y_w$  (кН), момент  $M_w$  (кНм) от действия 4-х балльного волнения с длиной волны  $\lambda = 60$  м, курсовой угол  $q_w$  ( $^\circ$ ) ( $q_{w0} = 35^\circ$ )

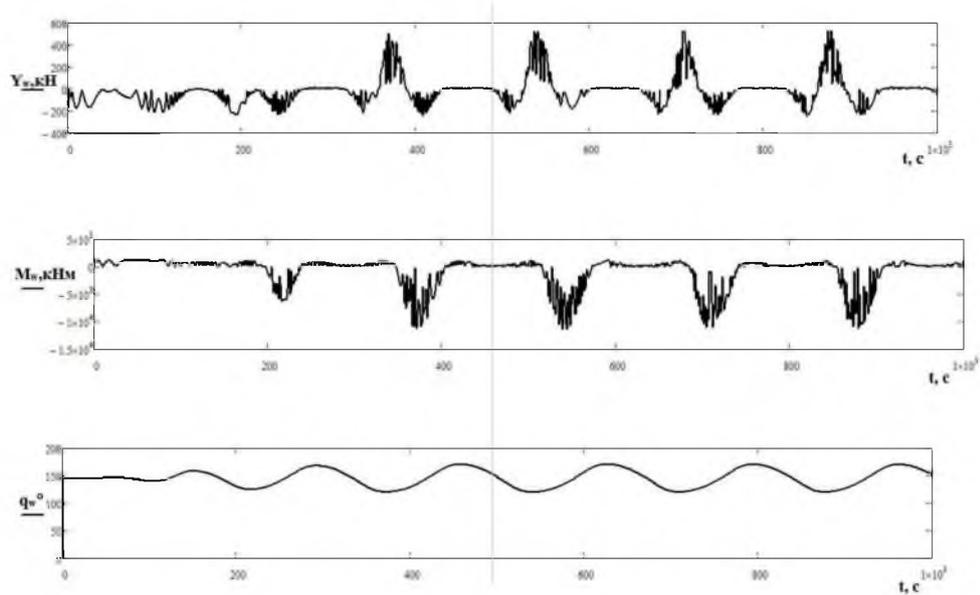


Рисунок 8 – Поперечное усилие  $Y_w$  (кН), момент  $M_w$  (кНм) от действия 4-х балльного волнения с длиной волны  $\lambda = 60$  м, курсовой угол  $q_w$  ( $^\circ$ ) ( $q_{w0} = 145^\circ$ )

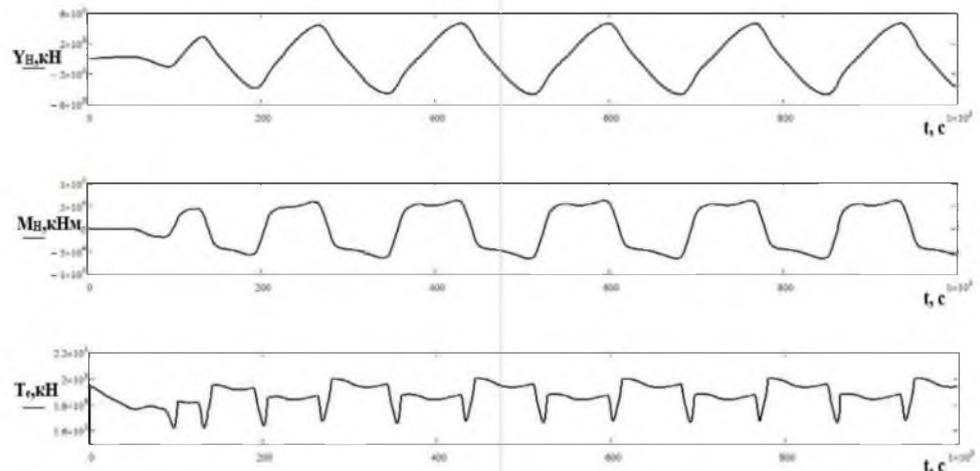


Рисунок 9 – Поперечное гидродинамическое усилие  $Y_H$  (кН), момент  $M_H$  (кНм) на корпусе судна, тяга движителя  $T_e$  (кН) при действии 4-х балльного волнения с длиной волны  $\lambda = 60$  м, при начальном курсовом угле  $q_{w0} = 145^\circ$

### Нерегулярное волнение

Моделирование манёвров судна в условиях нерегулярного волнения основывается на материалах, представленных в статье [5]. В этой статье предложена технология генерации действия нерегулярного волнения. Эта идея сводилась к представлению случайных процессов изменения волновых усилий в виде канонических разложений, амплитудными коэффициентами которых являются средние квадратические отклонения (СКО) соответствующих усилий (продольная  $X_w$ , поперечная  $Y_w$  силы и момент  $M_w$ ).

Эти коэффициенты вычислены для судна в среде MathCad и перенесены в виде массивов в среду VB6. Такой набор коэффициентов следует иметь для различных высот волны 3%-ой обеспеченности ( $h_{3\%}$ ) и для различных направлений действия двумерного нерегулярного волнения. Таких массивов коэффициентов создано 54. Такое их количество вызвано тем, что выбрано 9 дискретных направлений волнения:  $0^\circ$ - $35^\circ$  с шагом в  $5^\circ$  и  $90^\circ$ , остальные направления обрабатываются как отраженные асимметрично или симметрично. Выбрано также три высоты волны 3%-ой обеспеченности:  $h_{3\%} = 4, 5$  и  $6$  метров. Поскольку все это делается для трёх видов усилий ( $X_w, Y_w, M_w$ ), то получаем общее количество массивов коэффициентов  $9 \times 3 \times 3 = 54$ . Каждый массив имеет размерность 22 – в нулевом элементе записывается среднее значение усилия, остальные 21 коэффициент СКО. Такой приём позволяет эффективно генерировать необходимые усилия при моделировании действия нерегулярного волнения.

Перейдём непосредственно к результатам моделирования. В данном случае выбрана ситуация, рассмотренная при действии регулярного волнения, а именно, заданная линия неподвижна, в начальный момент проходит через ЦТ судна, начальный курс совпадает с ЗЛ. В отсутствие волнения это привело бы к движению вдоль ЗЛ без отклонений, система управления даже не включилась бы. Но действие регулярного волнения с направления  $q_w = 60^\circ$  и высотой волны  $h = 4$  м приводит систему управления в действие, её функционирование вызывает движение судна по меандрирующей вокруг ЗЛ траектории. Она показана чёрным цветом на рисунке 10. Здесь же для сравнения показана траектория (коричневая кривая), по которой движется судно, если с направления  $q_w = 60^\circ$  действует нерегулярное волнение с высотой волны  $h_{3\%} = 4$  м. Виден различный характер траекторий – регулярное чередование рысканий судна в первом случае сменяется на рыскание, носящее более хаотический характер. Нет

правильного чередования рысканий в сторону правого и левого борта судна, амплитуды зарыскиваний не равны друг другу. Все это свидетельствует о случайном характере процесса, точнее, о его стохастическом характере, в котором смешиваются систематическая и случайная компоненты.

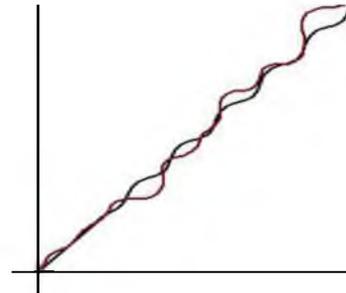


Рисунок 10 – Две траектории судна: при действии регулярного волнения (черная кривая)  $h = 4$  м; нерегулярного волнения (коричневая кривая)  $h_{3\%} = 4$  м одного направления ( $q_w = 60^\circ$ )

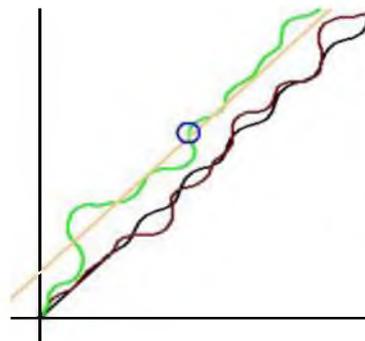


Рисунок 11 – Траектории движения судна в условиях волнения: траектории чёрного и коричневого цвета – взяты из рисунка 10 (регулярное волнение); траектория зелёного цвета в тех же условиях нерегулярного волнения при движении ЗЛ со скоростью 1 м/с в направлении  $330^\circ$

Это совершенно понятно, так как волновые воздействия носили характер случайного процесса, именно так мы их и генерировали. Но одно можно сказать – система управления по отклонениям справилась с задачей – в итоге судно движется вдоль неподвижной ЗЛ. Если усложнить задачу и заставить ЗЛ перемещаться, то рассматривается третья траектория, которая показана на рисунке 11 зелёным цветом в дополнение к двум предыдущим траекториям. Система управления также справляется с этой более сложной задачей и судно (синий кружок) движется вдоль перемещающейся ЗЛ (оранжевая линия). Правда, зарыскивания возрастают в сравнении с ними на траектории коричневого цвета. Но детали этого отличия рассмотрим ниже, применив аппарат показателей качества управления. Дополним изображения траекторий судна данными о различных характеристиках движения. Это сделано в графической форме на рисунках 12-15.

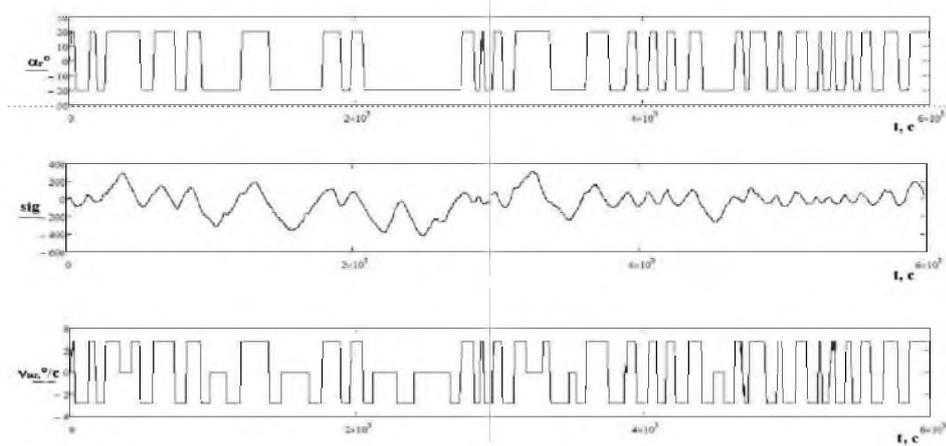


Рисунок 12 – Угол перекадки руля  $\alpha_r$  ( $^\circ$ ), управляющий сигнал sig и скорость перекадки руля  $v_{\alpha r}$  ( $^\circ/\text{с}$ ),  $h_{3\%} = 4$  м

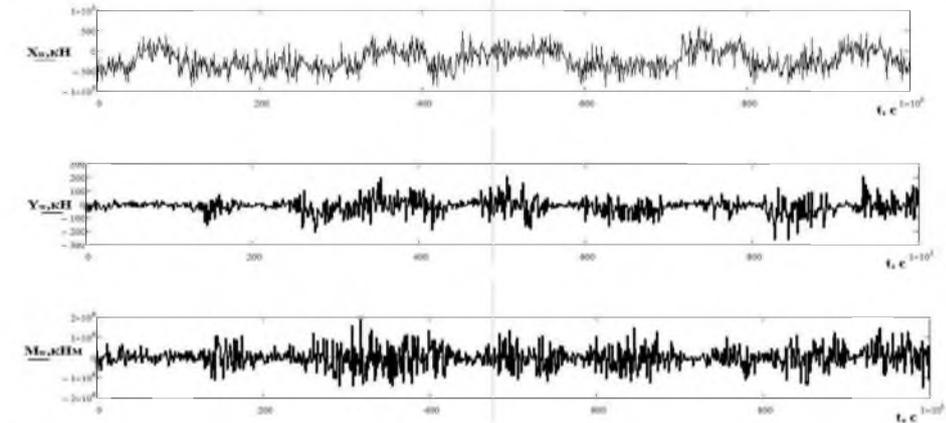


Рисунок 13 – Продольное  $X_w$  (кН) и поперечное усилия  $Y_w$  (кН) и момент  $M_w$  (кНм) в результате действия нерегулярного волнения

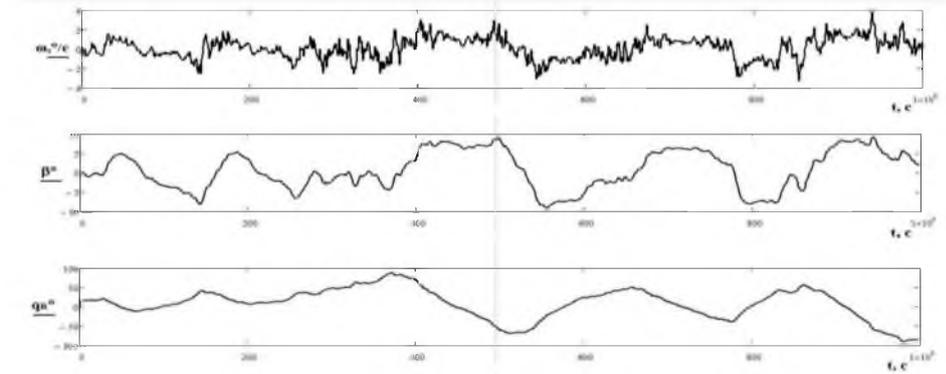


Рисунок 14 – Угловая скорость судна  $\omega$  ( $^\circ/\text{с}$ ), угол дрейфа  $\beta$  ( $^\circ$ ) и курсовой угол кажущегося ветра  $q_r$  ( $^\circ$ )

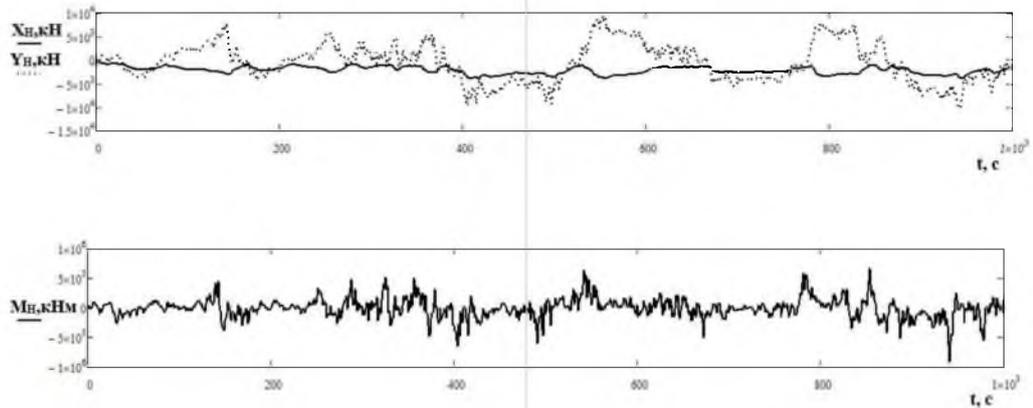


Рисунок 15 – Продольная  $X_H$  (кН) и поперечная  $Y_H$  (кН) составляющие гидродинамической силы на корпусе судна и её момент  $M_H$  (кНм) при движении в условиях нерегулярного волнения

На рисунке 12 приведены графики изменения угла перекадки руля  $\alpha_r$ , управляющий сигнал  $\text{sig}$  и скорость перекадки руля  $v_{\alpha r}$ . Эти графики хорошо демонстрируют степень хаотичности в поведении руля, что вполне отвечает характеру внешних воздействий со стороны волнения. На рисунке 14 приведены: угловая скорость судна  $\omega$ , угол дрейфа  $\beta$  и угол кажущегося ветра  $q_R$ . Эти кинематические параметры ещё раз подтверждают, что все процессы изменения параметров, сопровождающих движение, являются процессами случайными. В дополнение к кинематическим характеристикам на рисунках 13 и 15 приведены также силовые характеристики. Это продольная  $X_H$  и поперечная  $Y_H$  составляющие гидродинамической силы на корпусе судна и её момент  $M_H$  (рисунок 15) и усилия на корпусе из-за волнового воздействия (рисунок 13). Вид этих силовых характеристик ещё раз подтверждает стохастический характер поведения судна, ведомого системой управления по отклонениям под воздействием нерегулярного волнения.

В завершение рассмотрения вопроса о влиянии нерегулярного волнения на управление судном предлагаемым способом, рассмотрим влияние изменения высоты волны  $h_{3\%}$ . На рисунке 16 приведены три траектории для  $h_{3\%} = 3, 4$  и  $5$  м. Самой «спокойной» является траектория, показанная зелёным цветом ( $h_{3\%} = 3$  м), наибольшие отклонения возникают на траектории, показанной синим цветом ( $h_{3\%} = 5$  м). Более того, на последней траектории система управления не справляется с задачей управления, что демонстрирует вид

траектории. Это подтверждается и критериями качества управления.

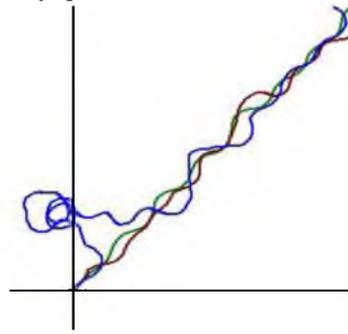


Рисунок 16 – Траектории маневрирования судна, управляемого по отклонениям при различной высоте волны  $h_{3\%}$  (траектория зелёного цвета – 3 м, коричневого – 4 м, синего – 5 м)

Критерий качества управления  $Q$  равен 2.2464, 5.5116 и 19.2673 для  $h_{3\%} = 3, 4$  и  $5$  м соответственно. Особо отметим резкое ухудшение качества управления при высоте волн  $h_{3\%} = 5$  м. Это говорит о том, что для волнений с большими высотами волн следует совершенствовать систему управления по отклонениям, например, вводить в неё дифференциальный компонент при формировании управляющего сигнала. Траектории, представленные на рисунке 16 достаточно, убедительно демонстрируют влияние высоты волн  $h_{3\%}$  на вид траектории маневрирования судна. Тем не менее, в дополнение к виду траекторий приведём информации о перекадке руля судна при движении по этим траекториям. На рисунках 17 и 18 показаны: угол перекадки руля  $\alpha_r$ , управляющий сигнал  $\text{sig}$  и скорость перекадки руля  $v_{\alpha r}$  для волнения с  $h_{3\%} = 3$  м (рисунок 17) и  $h_{3\%} = 5$  м (рисунок 18).

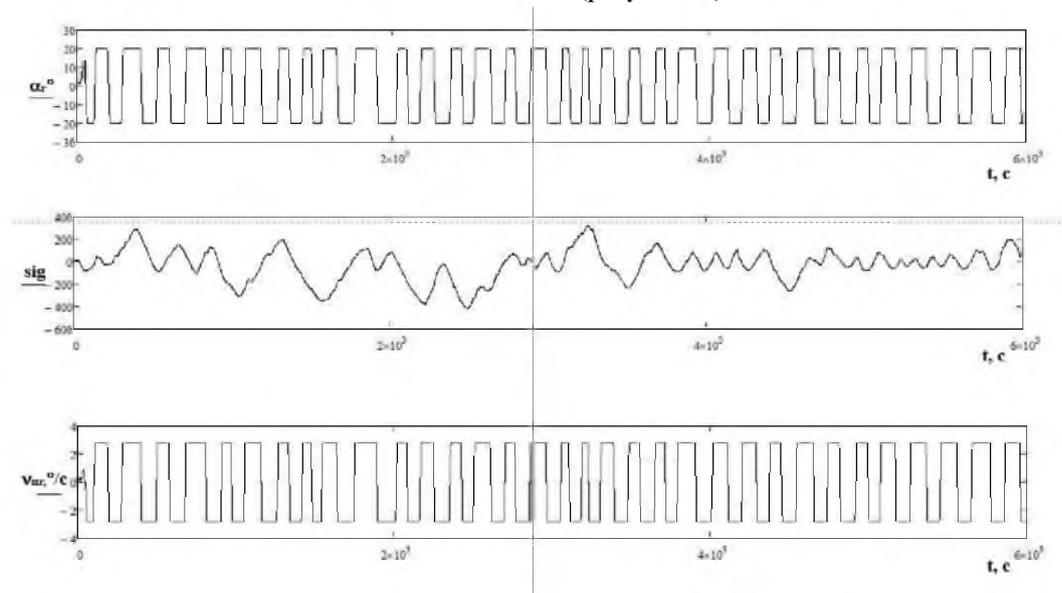


Рисунок 17– Угол перекадки руля  $\alpha_r$  (°), управляющий сигнал  $\text{sig}$  и скорость перекадки руля  $v_{\alpha r}$  (°/с),  $h_{3\%} = 3$  м

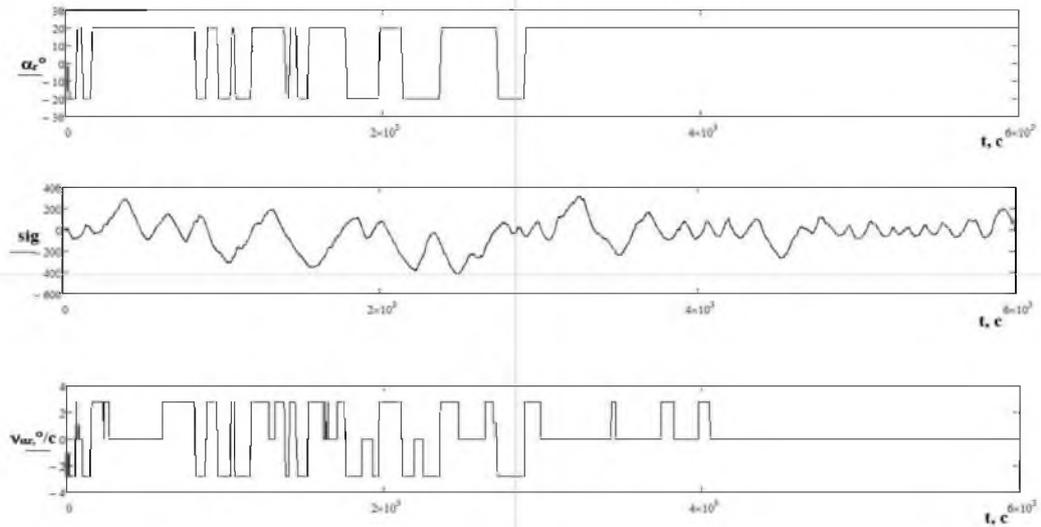


Рисунок 18 - Угол перекадки руля  $\alpha_r$  ( $^\circ$ ), управляющий сигнал sig и скорость перекадки руля  $v_{\alpha r}$  ( $^\circ/c$ ),  $h_{3\%} = 5$  м

Аналогичные данные были показаны на рисунке 12 для  $h_{3\%} = 4$  м. Простое сравнение этих рисунков, особенно по углу перекадки руля, показывает, насколько усложняется работа по управлению судном с ростом высоты волны  $h_{3\%}$  нерегулярного волнения. Заметим, что ранее этот эффект обнаруживался и в случае регулярного волнения, но не в такой степени.

#### Выводы.

На основании проведённых модельных испытаний с моделью контейнеровоза проекта ARCTICCONTAINERSHIPACS 650 в разных условиях плавания и различными стратегиями управления, можно сделать несколько принципиальных выводов:

- управление судном по отклонениям вполне дееспособно в реальных условиях плавания, т.е. при наличии в районе маневрирования ветро-волновых воздействий;
- диапазон условий, при которых возможна реализация предлагаемого способа управления движением судна достаточно широкий, скорость ветра до 15 м/с, волнение до 6 баллов (регулярное волнение), до 5 баллов (нерегулярное волнение);
- применительно к выбранному для проведения модельных экспериментов судну система управления чувствительна к двум параметрам волнения, высоте волны и её длине, а точнее к соотношению длины волны к длине судна;
- возможны ограничения при выборе курса движения по отношению к направлению ветра и волнения, предпочтительнее движение против ветра и волнения с курсовым углом не более  $60^\circ$ ;
- система управления движением судна по отклонениям также работоспособна при кормо-

вых курсовых углах ветра и волнения, если значения курсового угла находятся в диапазоне от  $140$  до  $180^\circ$ , а высота волны не превышает 4-х метров;

- рассмотренный способ управления движением судна может быть рекомендован для выполнения швартовой операции в условиях открытого моря;
- способ управления движением судна по отклонениям может быть положен в основу разработки автоматизированных систем управления движением судна по заданным траекториям.

#### Литература

1. Пат. 2475410 Российская Федерация, МПК В 63 Н 25/00 (2006.01). Способ управления судном при выполнении им швартовой операции к борту судна партнера / Юдин Ю.И., Холичев С.Н., Петров С.О.; заявитель и патентообладатель Мурманский гос. техн. ун-т.- № 2011137696/11; заявл. 13.09.2011; опубл. 20.02.2013, Бюл. № 5. - 7 с.: ил.
2. Пат. 2501064 Российская Федерация, МПК В 63 Н 25/52 (2006.01). Способ управления траекторией движения судна / Юдин Ю.И., Холичев С.Н., Петров С.О.; заявитель и патентообладатель Мурман. госуд. техн. ун-т.- № 2012108992/11; заявл. 11.03.2012; опубл. 10.12.2013, Бюл. № 34. - 9 с.: ил.
3. Пат. 2509031 Российская Федерация, МПК В 63 Н 25/52 (2006.01). Способ управления судном при выполнении им швартовой операции к борту судна партнера, стоящего на якоре / Юдин Ю.И., Иванов В.В., Холичев С.Н., Петров С.О.; заявитель и патентообладатель Мурман. госуд. техн. ун-т.- № 2012143196/11; заявл. 09.10.2012; опубл. 10.03.2014, Бюл. № 7. - 9 с.:
4. Справочник по теории корабля. В 3 т. Т. 3. Управляемость водоизмещающих судов. Гид-

родинамика судов с динамическими принципами поддержания / под ред. Я.И. Войткунского. – Л.: Судостроение, 1985. – 544 с.: ил.

5. Юдин, Ю.И. Метод моделирования силового воздействия нерегулярного волнения на танкер [Текст]/ Ю.И. Юдин, В.В. Перевозов // Эксплуатация морского транспорта. - 2019. - № 2(91). - С. 50-59.
6. Юдин Ю.И. Расчёт аэродинамических усилий [Текст]/Ю.И. Юдин, Г.Ю. Ищейкин //Морские интеллектуальные технологии/ – 2019. - № 4 Т.3. С. 24-32
7. Юдин, Ю.И. Расчет переменных составляющих воздействия регулярного волнения на танкер [Текст]/ Ю.И. Юдин, В.В. Перевозов // Эксплуатация морского транспорта. - 2019. - № 1(90). - С. 38-45.
8. Юдин, Ю.И. Идентификация математической модели контейнеровоза проекта ARCTIC CONTAINER SHIP ACS 650 для различных этапов швартовки[Текст]/ Ю.И. Юдин, С.В. Папенцев, Б.В. Дабижа, Г.М. Соловьёв, С.О. Петров // Эксплуатация морского транспорта. - 2019. - № 3(92). - С. 89-107.
- gosud. tekhn. un-t.- № 2012108992/11; zayavl. 11.03.2012; opubl. 10.12.2013, Byul. № 34. – 9 s.: il.
3. Pat. 2509031 Rossijskaya Federaciya, MPK V 63 N 25/52 (2006.01). Sposob upravleniyasudnom pri vypolnenii im shvartovnoj operacii k bortu sudna partnera, stoyashchego na yakore / YUdin YU.I., Ivanov V.V., Holichev S.N., Petrov S.O.; zayavitel' i patentoobladatel' Murman. gosud. tekhn. un-t.- № 2012143196/11; zayavl. 09.10.2012; opubl. 10.03.2014, Byul. № 7. – 9 s.: il.
4. Spravochnik po teorii korablya. V 3 t. T. 3. Upravlyaemost' vodoizmeshchayushchih sudov. Gidrodinamika sudov s dinamicheskimi principami podderzhaniya / pod red. YA.I. Vojtkunskogo. – L.: Sudostroenie, 1985. – 544 s.: il.
5. YUdin, YU.I. Metod modelirovaniya silovogo vozdejstviya neregulyarnogo volneniya na tanker [Tekst]/ YU.I. YUdin, V.V. Perevozov // Ekspluatatsiya morskogo transporta. - 2019. - № 2(91). - S. 50-59.
6. YUdin YU.I. Raschyot aerodinamicheskikh usilij [Tekst]/YU.I. YUdin, G.YU. Ishcheykin//Morskie intellektual'nye tekhnologii/Marine intellectual technologies – 2019. - № 4 Т.3. S. 24-32
7. YUdin, YU.I. Raschet peremennyh sostavlyayushchih vozdejstviya regul'yarnogo volneniya na tanker [Tekst]/ YU.I. YUdin, V.V. Perevozov // Ekspluatatsiya morskogo transporta. - 2019. - № 1(90). - S. 38-45.
8. YUdin, YU.I. Identifikaciya matematicheskoy modeli kontejnerovoza proekta ARCTIC CONTAINER SHIP ACS 650 dlya razlichnyh etapov shvartovki[Tekst]/ YU.I. YUdin, S.V. Pashencev, B.V. Dabizha, G.M. Solov'yov, S.O. Petrov // Ekspluatatsiya morskogo transporta. - 2019. - № 3(92). - S. 89-107.

#### References

УДК 629.12.001.2

DOI: 10.34046/aumsuomt101/13

## МЕСТО МППСС-72 В РЕАЛИЯХ ИЗМЕНЯЮЩЕГОСЯ СУДОХОДСТВА (К 50-ЛЕТИЮ МППСС-72)

*В. В. Астреин, доктор технических наук, профессор*

В современном судоходстве около 20% аварий происходят по причине столкновений судов. Этот показатель сохраняется длительное время со слабой тенденцией к уменьшению. Для решения проблемы аварийности выдвигаются разные предложения, в том числе и предложение принятия новых МППСС. Однако философия и концепция предлагаемых новых правил остается без изменения, поэтому такая замена является нецелесообразной и даже вредной. Изменение МППСС-72 к требованиям современного судоходства может произойти из-за внедрения новых технологий и технических средств: систем поддержки принятия решений и автоматизации судоходства. Это потребует значительной переработки законодательных инструментов ИМО, в том числе и МППСС-72. В статье рассматриваются два подхода. Первый подход (ИМО) направлен на сохранение МППСС-72 в качестве основы для предупреждения столкновений судов. Второй подход основан не на Правилах, а на индивидуализированной оценке ситуации сближения судов. Первый подход предусматривает подстройку МППСС-72 к каждому уровню автономного судоходства, а второй направлен на создание автоматической системы предупре-