

Динамика корабля в штормовом море и нормы остойчивости

*С. В. Антоненко, Н. И. Восковицук*¹

В работе сделан краткий исторический обзор развития требований Регистра к остойчивости морских судов. Более подробно рассматривается с физических позиций основной критерий – «критерий погоды». Указаны принятые допущения в соответствии с теорией динамической остойчивости. Выполнены численные расчеты наклонений судна при шквале.

The dynamics of the ship in stormy sea, and the norms of stability. *Sergey V. Antonenko, Nikolay I. Voskovschuk, Far-Eastern National Technical University.*

The paper give a brief historical review of the requirements of the Russian Register of Shipping for the stability of ships. Discussed in more detail of the physical positions of the main criterion – a criterion for the weather. Indicated the assumptions made in accordance with the theory of dynamic stability. The numerical calculations of inclination of the vessel during squall.

Введение

Опрокидывание судна в штормовых условиях является наиболее опасным видом аварии ввиду того, что может происходить практически мгновенно, в течение считанных секунд, не оставляя членам экипажа (не говоря уже о пассажирах, если они есть) времени на спасение. Для обеспечения безопасности плавания служат нормы остойчивости, от совершенства которых зависят как эксплуатационные, так и экономические показатели судна. При завышенных требованиях, как известно, ухудшаются характеристики бортовой качки: она делается более порывистой, уменьшается длина резонансной волны, что повышает вероятность сильной качки. Связанное с этим увеличение отношения ширины судна к его осадке, скорее всего, приведет к росту сопротивления воды, особенно в условиях морского волнения. Если же требования к остойчивости ослабить, очевидно, возрастет опасность потери остойчивости, что несравненно хуже. Эти очевидные соображения стимулируют развитие норм остойчивости в разных странах.

¹ *Антоненко Сергей Владимирович*, профессор кафедры теории и проектирования судов, доктор технических наук; *Восковицук Николай Иванович*, директор Кораблестроительного института Дальневосточного государственного технического университета, кандидат технических наук, профессор.

Из истории развития норм остойчивости

Развитие норм остойчивости шло по пути их усложнения. Наиболее просто нормировать начальную поперечную метацентрическую высоту. В Правилах, например, 1995 г. требовалось, чтобы она была положительной. В Правилах 2003 г. она уже должна быть не менее 0,15 м. Но одного этого критерия недостаточно – низкобортное судно, имеющее положительную начальную остойчивость, может опрокинуться при входе палубы в воду. Поэтому потребовалось установить требования к параметрам диаграммы остойчивости: углам максимума и заката диаграммы и максимальному ее плечу. Но эти критерии практически регламентируют статическую остойчивость и не учитывают эксплуатационные динамические воздействия. Уже довольно длительное время основным критерием считается «критерий погоды», который характеризует динамическую остойчивость судна при совместном действии ветра и волн. В последние годы, кроме упомянутых требований, появились дополнительные требования, регламентирующие динамическую остойчивость.

Физический смысл критерия погоды прост и понятен. Наибольшую опасность с точки зрения возможности опрокидывания представляет случай, когда судно, расположенное лагом к ветру и волнению, испытывает сильную качку. В момент, когда оно в результате качки наклонилось на максимальный угол (для определенности – на левый борт), налетел шквал. После этого судно наклоняется на правый борт из-за совместного действия порыва ветра и волн. Согласно линейной теории динамической остойчивости наклонение судна от обоих воздействий можно рассчитывать отдельно, а затем результаты сложить. От каждой из указанных причин максимальный крен на правый борт достигается через $\frac{1}{2}$ собственного периода качки. При этом не должно произойти опрокидывания.

В Правилах Регистра, изданных до 2003 г. [1], считалось, что в исходном состоянии, до того, как налетел шквал, ветровой нагрузки на судно не было. Качка происходила относительно прямого положения. Поперечная нагрузка от действия ветра уравнивалась силой инерции судна, приложенной в районе ватерлинии. В Правилах 2003 г. [2] смешаны два способа определения критерия погоды. Так, по формуле (2.1.2.1) плечо кренящего момента от ветра отсчитывается от действующей ватерлинии, схема определения опрокидывающего момента, приводимая в Приложении 2, осталась прежней. Расчетное давление ветра (применительно к судну, рассматриваемому ниже) составляет 1079 Па. Но для судов, постройка которых начата после 1.7.2002 г., предлагается другая схема. Принимается, что на судно в исходном состоянии действует ветер постоянной силы, который вызывает начальный крен на правый борт. Качка происходит относительно этого наклоненного положения. Налетевший с левого борта шквал создает дополнительную к исходной поперечную нагрузку, по величине она заметно меньше той, которая вводилась в

расчет в прежних Правилах (давление ветра 504 Па). Эта сила уравнивается гидродинамической силой, приложенной посередине осадки, т. е. плечо кренящего момента увеличилось. В последующих изданиях Правил [3] используется эта новая схема.

Допущения, принятые в нормах

С позиций теории динамической остойчивости [4, 5], методика, предлагаемая Регистром, содержит ряд допущений, одни из которых приводят к ошибке в опасную, другие – в безопасную сторону.

1. Кренящий момент от ветра принимается не зависящим от угла крена, хотя в действительности при наличии крена он уменьшается за счет уменьшения площади парусности и коэффициента сопротивления наклоненного борта. С другой стороны, по мере нарастания скорости дрейфа понижается точка приложения равнодействующей гидродинамических сил. Влияние этого фактора на наклонение судна мало.

2. В ранних изданиях Правил [1] плечо кренящего момента отсчитывалось от центра парусности до ватерлинии. Фактически горизонтальная сила давления ветра уравнивается горизонтальными силами инерции самого судна и присоединенной воды, а также силой сопротивления воды (демпфирования). Первая из указанных сил приложена в центре тяжести судна, который нередко располагается вблизи ватерлинии, точки же приложения гидродинамических сил располагаются при умеренных отношениях ширины к осадке V/d – в районе середины осадки, при больших V/d могут оказаться ниже основной плоскости. Дело в том, что при дрейфе, кроме пары сил в горизонтальной плоскости, появляется пара сил в вертикальной плоскости, вызванная обтеканием шпангоутов судна.

3. В Правилах динамический угол крена определяется из условия равенства работ кренящего и восстанавливающего моментов. Но, строго говоря, здесь следует учесть также работы возмущающего момента от волн и демпфирующего момента, которые компенсируют друг друга при установившейся качке на регулярном волнении, но не компенсируют при действии внешнего кренящего момента. Это несколько уменьшает угол крена.

4. Предполагается, что повышенное давление при шквале одинаково действует на всю площадь парусности и не изменяется все время наклонения, что также приводит к ошибке в безопасную сторону. Установлено [5], что средняя продолжительность порывов для сильного ветра составляет около 2,5 с, а в отдельных случаях 6–7 с и более. При малой остойчивости время наклонения (половина собственного периода бортовой качки) порядка 10 с, за это время сила порыва ветра может заметно уменьшиться. Время нарастания скорости ветра при шквале иногда может измеряться минутами, что практически будет означать статическое приложение нагрузки.

5. По сути дела, используется модель регулярного волнения, частота которого равна собственной частоте бортовой качки, при этом шквал налетел именно в момент наибольшего наклона судна. Это допущение также действует в безопасную сторону.

6. Предполагается, что наибольший динамический крен при действии только поперечной силы, без волн, составляет ровно $\frac{1}{2}$ периода бортовой качки T_θ . В действительности, как показывают расчеты, это время немного больше (примерно до $0,6 T_\theta$).

Несовершенство существующих норм остойчивости заключается еще и в том, что диаграмма остойчивости строится для положения судна на тихой воде. Известно, что на вершине попутной волны остойчивость ухудшается. Это обстоятельство в настоящее время учитывается при оценке остойчивости малых промысловых судов, но требует трудоемких вычислений. Для судов транспортного флота такой учет не производится.

Обратим внимание еще на одно обстоятельство. Традиционные расчеты качки базируются на модели вынужденных колебаний, резонанс которых наступает, когда частота возмущающей силы совпадает с собственной частотой. В последние годы, как можно судить по ряду зарубежных публикаций, вырос интерес к параметрическим колебаниям, возникающим в результате периодического изменения коэффициента остойчивости при взаимодействии бортовой и вертикальной качки. Характерно, что главный параметрический резонанс наблюдается при частоте, в два раза меньшей, чем собственная частота бортовой качки. Параметрический резонанс характерен для судов, перевозящих большое количество палубного груза, из-за чего центр тяжести судна оказывается на значительном удалении от ватерлинии (это расстояние является одним из важнейших параметров, влияющих на наступление параметрического резонанса). Особенно опасен в этом отношении случай, когда собственная частота вертикальной качки в два раза меньше, чем бортовой.

Механика взаимодействия волн и ветра с судном сложна и до конца не исследована. В частности, В. А. Абрамовский [6] указывает на возможность «тройного резонанса» (волнение – ветер – судно) за счет наличия корреляции действия переменного поля давлений ветра вблизи взволнованной поверхности и возмущающего момента от волн. Структура поля скоростей и давлений воздуха зависит от типа подстилающей поверхности (воды). Движение поверхности моря индуцирует в нижнем слое воздуха («зоне волнового влияния») колебания. Размер этой зоны соизмерим с высотой надводного борта судна или превышает ее. В результате такого взаимодействия ветра и волн амплитуда качки судна увеличивается.

О взаимосвязи критериев остойчивости

Остановимся на требованиях Правил к диаграмме остойчивости. В них регламентируются плечи динамической остойчивости (площади диаграммы

статической остойчивости) при углах крена 30° и 40° , которые должны быть не менее $0,055$ м·рад и $0,09$ м·рад соответственно, а также их разность ($0,03$ м·рад). Если принять диаграмму прямолинейной, эти требования равносильны установлению минимальной метацентрической высоты (средней в указанных интервалах) $0,40$ м, $0,37$ м и $0,28$ м соответственно. Укажем также, что при принятом допущении для обеспечения максимального плеча статической остойчивости, равного $0,25$ м, при угле крена 30° метацентрическая высота должна быть не менее $0,48$ м, а при плече $0,20$ м – не менее $0,38$ м. Если учесть, что начальная метацентрическая высота не должна быть меньше $0,15$ м, эти требования предполагают или S-образную диаграмму плеч статической остойчивости (как у достаточно крупных полных судов), или увеличение начальной метацентрической высоты при выпуклой диаграмме хотя бы до $0,5$ м.

Численное исследование процесса наклонения

Для иллюстрации процесса наклонения судна на волнении при действии поперечной силы в работе выполнен ряд численных расчетов. Как известно, большие наклонения описываются нелинейными уравнениями, для которых не получается аналитическое решение. В эти уравнения можно ввести любую диаграмму плеч статической остойчивости, а также принять квадратичный или иной закон сопротивления. Решение таких уравнений нетрудно получить путем численного интегрирования. Нами составлена программа, позволяющая рассчитывать процесс наклонения судна на регулярном или нерегулярном волнении при наличии изменяющейся во времени поперечной силы. Реальная диаграмма плеч статической остойчивости аппроксимируется рядом синусов, состоящим из 6 членов, сопротивление бортовой качке может складываться из линейной и квадратичной составляющей. Нерегулярная волна с заданной высотой с 3%-ной обеспеченностью $h_{3\%}$ моделируется суммой 10 регулярных волн с одинаковыми амплитудами и случайными фазовыми углами. Средний период волн принимается равным $T_{cp} = 3,3\sqrt{h_{3\%}}$. Частоты каждой регулярной волны получаются умножением средней частоты $\omega = \frac{2\pi}{T_{cp}}$ на множитель, полученный путем обработки интегральной кривой спектральной плотности волновых ординат. Этот ряд множителей составлен так, чтобы дисперсии и, соответственно, амплитуды каждой гармоники были одинаковыми [7].

Алгоритм расчета построен следующим образом. Задаются все необходимые характеристики судна, волнения и поперечной силы, начальные условия (угол крена и угловая скорость), а также шаг по времени ($0,03$ с). Подсчитываются все составляющие кренящего момента, естественно, без момента сил инерции самого судна, который определяется как неуравновешенный мо-

мент. Через него рассчитываются угловое ускорение, скорость и угол крена в конце шага. Далее цикл повторяется заданное число раз.

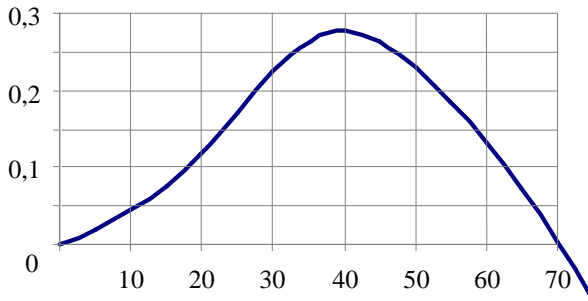


Рис. 1. Диаграмма плеч статической остойчивости

Для анализа было выбрано судно типа «Пионер Москвы»; его длина 119 м, водоизмещение в грузу 10 700 т. Начальная поперечная метацентрическая высота принималась равной 0,2 м. Расчетная форма диаграммы плеч статической остойчивости приведена на рис. 1. Собственный период бортовой качки (при малых наклонениях) при принятых исходных данных равен 30,5 с. Статический угол крена от действия ветра согласно [3] составляет $10,5^\circ$ на правый борт, начальный угол крена на левый борт $-12,5^\circ$.

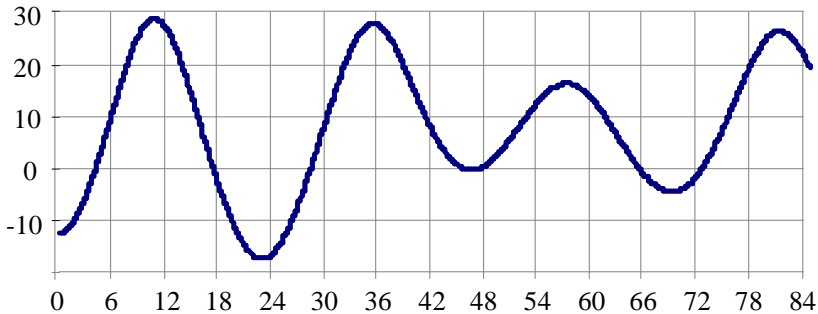


Рис. 2. Качка судна под действием шквала на резонансной волне

Первоначально для численного расчета была выбрана регулярная волна, близкая к резонансной, с таким расчетом, чтобы амплитуда качки совпала с рассчитанной по Правилам Регистра [3] (23°). Поскольку при малой остойчивости собственный период велик, элементы этой волны получились нереальными. Процесс колебаний при совместном действии шквала и волнения показан на рис. 2. По горизонтальной оси отложено время с момента приложения динамической нагрузки от шквала в секундах, по вертикальной оси — углы крена в градусах. Укажем, что динамический угол крена, найденный соответствующим построением, составил 32° .

В этом примере максимальное наклонение составило примерно 30° , что на 10 % меньше определенного графическим построением. Интересно также,

что время, потребовавшееся для него, составило 10 с, т. е. $1/3$ от собственного периода, а период первого колебания получился меньше, чем собственный период качки и период набегающих волн – 23 с вместо 30 с. Далее качка представляет собой результат сложения качки на волнении, затухающих собственных колебаний и статического крена и имеет нерегулярный характер.

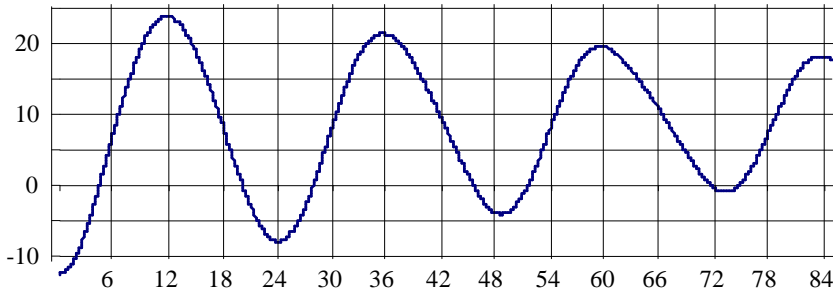


Рис. 3. Качка судна под действием шквала на волне высотой 8 м

На рис. 3 приведен аналогичный график для случая регулярного волнения с длиной 136 м, высотой 8 м и периодом 9,3 с. Здесь влияние качки относительно невелико (возмущающий момент от волн примерно в 3 раза меньше, чем кренящий момент от шквала), поэтому довольно четко видны затухающие колебания.

Период колебаний на рис. 3 близок к 24 с. Для других высот волн он обычно остается примерно таким же. Здесь проявляется влияние нелинейности диаграммы остойчивости. Если откорректировать метацентрическую высоту с учетом полученных амплитуд качки, то собственный период уменьшится до указанной величины.

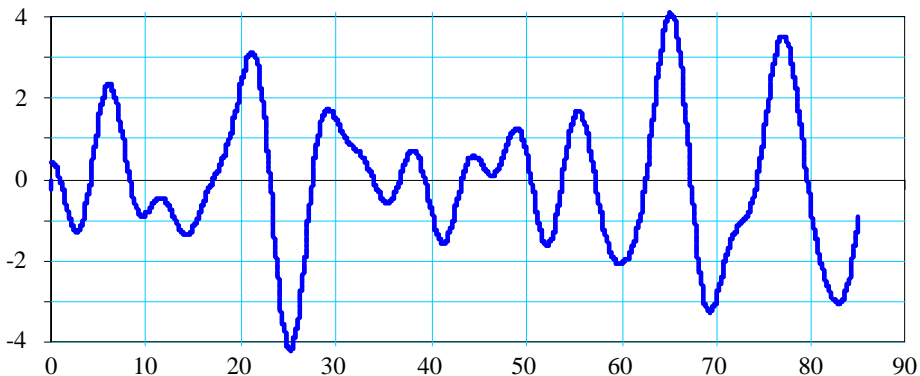
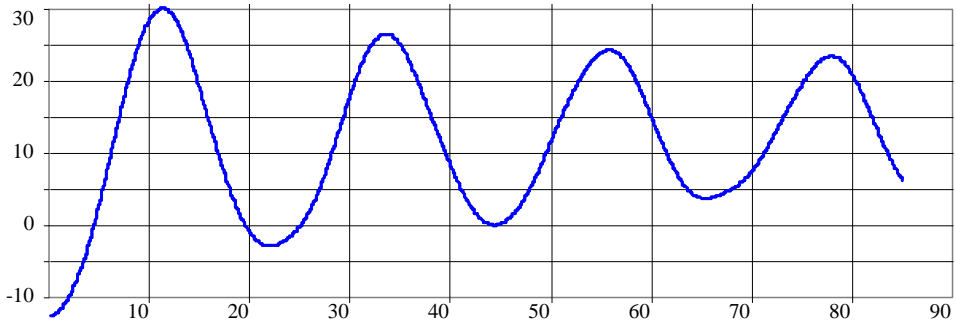


Рис. 4. Реализация процесса морского волнения при $h_{3\%} = 8$ м

По мере увеличения высоты волны влияние качки на вид кривой имеет тенденцию к усилению – на затухающие колебания с собственной частотой накладываются все более заметные вынужденные колебания с частотой воз-

мущающей силы. Наибольшее наклонение составляет 28–29°, что на 10 % меньше определяемого по Правилам Регистра. Период набегающих волн всегда намного меньше собственного периода, и от их соотношения зависит вид кривой. Эти графики здесь не приводятся.



1

Рис. 5. Качка судна под действием шквала на волнении с $h_{3\%} = 8$ м

Для сравнения на рис. 5 показан процесс качки судна на нерегулярном волнении при высоте волны с 3%-ной обеспеченностью $h_{3\%} = 8$ м. Ординаты этих волн в метрах приведены на рис. 4.

В более ранних редакциях Правил, напомним, качка судна до момента воздействия шквала происходила относительно прямого положения, давление ветра имело большую величину, но плечо кренящего момента было меньше. В рассматриваемом нами примере кренящий момент от ветра по новым Правилам составляет 4860 кН·м, сила давления ветра 605 кН. В прежней редакции Правил сила ветра увеличивается до 1295 кН, в результате уменьшения плеча момент возрастает ненамного и равен 5660 кН·м.

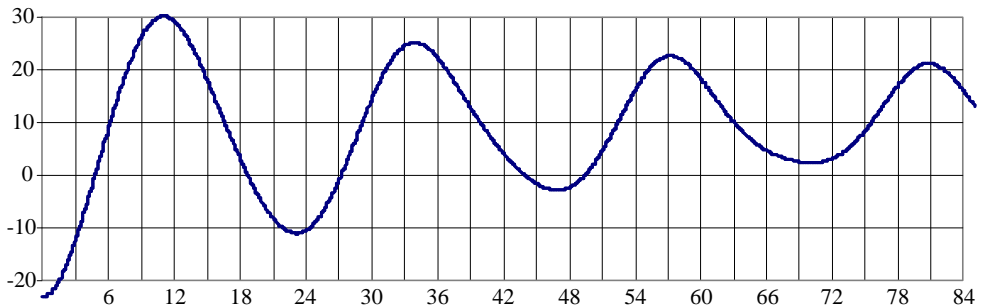


Рис. 6. Качка судна под действием шквала на волне высотой 8 м

Ниже приведены некоторые результаты расчетов наклонений судна при использовании старых Правил. Начальный угол крена увеличен до -23° , изменены, как указано, сила и момент от ветра. Найденный графическим путем динамический угол крена в этом случае равен $37,5^\circ$. Увеличение угла дина-

мического крена при уменьшении кренящего момента обусловлено увеличением начального угла крена.

Рис. 6 соответствует рис. 3 и показывает процесс качки судна под действием ветра и регулярных волн высотой 8 м. Рис. 7 соответствует рис. 5, здесь показано действие нерегулярного волнения с $h_{3\%} = 8$ м.

Как видим из рис. 6, наибольшее наклонение получилось равным 30° , что больше, чем на рис. 3, но заметно меньше величины, полученной графическим путем. Время наибольшего наклонения и период затухающих колебаний изменились незначительно, хотя начальный угол крена и увеличился.

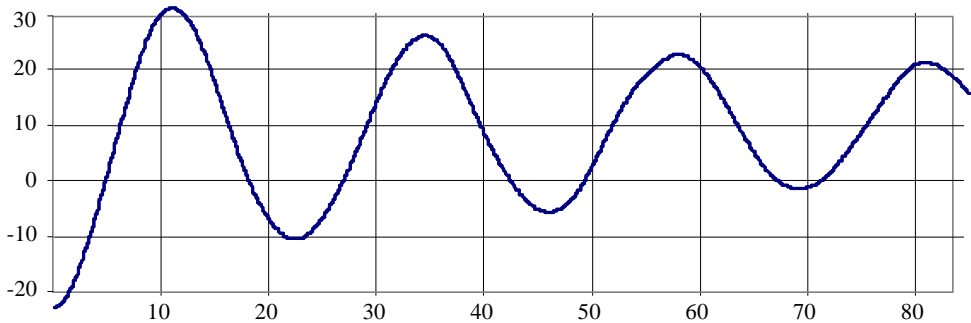


Рис. 7. Качка судна под действием шквала на волнении с $h_{3\%} = 8$ м

Как и в предыдущем случае (рис. 5), нерегулярность даже довольно интенсивного волнения высотой 8 м слабо сказывается на форме кривой затухающих колебаний, вынужденные колебания на рис. 7 практически незаметны. Изменение входных данных в рассмотренном случае не привело к существенным изменениям амплитуды или периода качки.

Время от момента приложения динамической нагрузки от шквала при обоих значениях начального крена (и нулевой начальной скорости), как и принято считать, очень близко к половине собственного периода бортовой качки, определенного с учетом нелинейности диаграммы остойчивости.

Отметим одну характерную особенность, которая заключается в том, что максимальное наклонение слабо зависит от высоты расчетной волны. Правда, мы здесь не учитываем, что интенсивность волнения непосредственно влияет на амплитуду качки, которая здесь принималась неизменной в соответствии с Правилами Регистра. Изменение нормы ветровой нагрузки и способа определения величины ветрового момента для рассмотренного судна также не привело к существенному изменению угла динамического крена.

Заключение

Экспериментальные и теоретические исследования указывают на имеющиеся несовершенства методики нормирования остойчивости судов, которая в настоящее время не учитывает некоторые существенные факторы. Это, например, размеры зоны действия шквала и продолжительность его дей-

ствия, искажение поля скоростей и давлений ветра у взволнованной поверхности моря. Использование численных методов анализа поведения судов на волнении дает возможность более детально анализировать влияние различных факторов на остойчивость судов в штормовых условиях.

Таким образом, можно ожидать, что в недалеком будущем нормы остойчивости будут изменяться в направлении более полного учета особенностей поведения судна на взволнованном море.

Литература

1. Правила классификации и постройки морских судов. – Том 1: Морской Регистр судоходства. – СПб., 1995.
2. Правила классификации и постройки морских судов. – Том 1: Российский Морской Регистр судоходства. – СПб., 2003.
3. Правила классификации и постройки морских судов. – Том 1: Российский Морской Регистр судоходства. – СПб., 2005.
4. Семенов-Тянь-Шанский В. В., Благовещенский С. Н., Холодилин А. Н. Качка корабля. – Л.: Судостроение, 1969.
5. Справочник по теории корабля: в 3 т. – Том 2: Статика судов. Качка судов / Под ред. Я. И. Войткунского. – Л.: Судостроение. – 1985.
6. Абрамовский В. А. Влияние структуры поля скоростей ветра над волнением на динамику морских объектов. – Л.: Судостроение. – 2009. – № 6. – С. 41–46.
7. Антоненко С. В. Практическая оценка остойчивости в открытом море по капитанской формуле // Мореходство и морские науки–2009: избранные доклады Второй Сахалинской региональной морской научно-технической конференции (23 сентября 2009 г.) / Под ред. В. Н. Храмушина. – Южно-Сахалинск: СахГУ, 2010. – С. 21–28.