

УДК 656.61.052

**CALCULATION OF TARGET ORIGINATED RESTRICTIONS
ON B-MANOEUVRE OF OWN SHIP****РАСЧЕТ ПОРОЖДАЕМЫХ «ЦЕЛЬЮ» ОГРАНИЧЕНИЙ НА
В-МАНЕВР СОБСТВЕННОГО СУДНА***L.L. Vagushchenko, DSc, professor**A.L. Vagushchenko, PhD, associate professor**Л.Л. Вагущенко, д.т.н., профессор**А.Л. Вагущенко, к.т.н., доцент**Odessa National Maritime Academy, Ukraine**Одесская Национальная Морская Академия, Украина***ABSTRACT**

For avoidance of close quarter situations with other vessels shift of own ship (OS) to the parallel line of a way can be used. This action is called a B-manoeuve or Z-manoeuve. The method of B-manoeuve selection in a dialogue mode with the collision avoidance system (CAS) is based on the use of graphic elements - predicted dangerous areas at B-manoeuve (PAD_B) or their marks. If the calculation of PAD_B marks does not consider the dynamics of OS, actual movement of this ship will not coincide with planned on these marks motion. In this article the algorithm of calculation of PAD_B marks, which takes into account inertia of OS, is offered.

Keywords: collision avoidance, B-manoeuve, predicted area of danger, PAD mark.

Постановка проблемы в общем виде и ее связь с важными научными или практическими задачами

Проблема обеспечения безопасного расхождения судов является одной из основных в мореплавании. Одним из аспектов ее решения является разработка изобразительных моделей, помогающих судоводителям осуществлять выбор маневров с несколькими судами, что определяет актуальность рассматриваемой тематики.

Анализ последних достижений и публикаций, в которых начато решение данной проблемы и выделение нерешенных ранее частей общей проблемы

На судах для предупреждения столкновений с судами применяются маневры различных видов [1-4]: курсом, скоростью, одновременно курсом и скоростью. Выбор вида действия для безопасного прохождения встречных судов определяется преобладающими обстоятельствами и условиями плавания. Одним из распространенных действий для избежания чрезмерного сближения с судами является В-маневр. Этот маневр в ряде источников называется также Z-маневром. Его схемы с пренебрежением и с учетом инерционности судна

оператора представлены в работе [1]. Для выбора В-маневров в режиме диалога с бортовой системой предупреждения столкновений предложено формировать на земной поверхности специальные области, называемые ниже опасными при В-маневре зонами акватории, порождаемыми «целями». Сокращенно эти зоны обозначаются OZA_J , где индекс J показывает, какой «цели» принадлежит эта зона. OZA_J может применяться как для выбора В-маневров, так и для оценки опасности столкновения. Такая опасность существует, когда линия пути судна оператора проходит через OZA_J другого судна.

OZA_J получается проектированием в область истинного перемещения судна оператора (СО) домена опасности «цели» из области движения СО относительно этой «цели» при В-маневре. Конфигурация OZA_J зависит от взаимного расположения судна оператора и «цели», элементов их движения и от принятого домена опасности «цели». В общем случае при отображении коллизионных ситуаций метки OZA_J могут основываться на неодинаковых по форме и размерам доменах «целей». При нескольких «целях» зоны OZA_J загромождают экран, и изображение ситуации теряет наглядность. Поэтому вместо OZA_J предложено [1] использовать метки, которые отражают основные свойства этих зон.

Намечаемая по меткам траектория В-маневра представляет собой маршрут судна оператора для предотвращения столкновений с «целями». При следовании по этому маршруту поворот с одного его отрезка на другой должен начинаться с упреждением, необходимым для точного выхода на новый отрезок пути. Пока при расчете меток, отражающих ограничения «целей» на выбираемый В-маневр, динамика судна при повороте не учитывалась. Это приводит в процессе выполнения маневра к отличию значения дистанции кратчайшего сближения (ДСРА) от ее значения, соответствующего плану прохождения опасного судна. Разница этих значений иногда достигает пять кабельтов. Такая погрешность может серьезно повлиять на безопасность расхождения.

Формулировка целей статьи (постановка задачи)

Целью работы является создание алгоритма расчета меток опасных при В-маневре областей, который учитывает инерционность судна оператора. В результате, в процессе движения по запланированному по этим меткам маршруту не возникнет существенного отличия в значениях действительной и соответствующей выбранному плану дистанции кратчайшего сближения.

Изложение материалов исследования с обоснованием полученных научных результатов

Связанный с «целью» домен опасности ниже принят круговым с центром в месте «цели». Радиус этого круга берется равным заданному пределу d^s безопасных значений ДСРА.

Зона OZA_J отражает: связанную с землей область опасных позиций судна оператора по отношению к «цели» при В-маневре, интервал опасных смещений при таком маневре, точку начала опасных курсов уклонения под заданным

углом к исходному курсу. При выборе В-маневра основной интерес представляет второе и третье свойства опасной зоны. Ими обладает и метка MZ опасной зоны акватории, показанная на рис. 1.

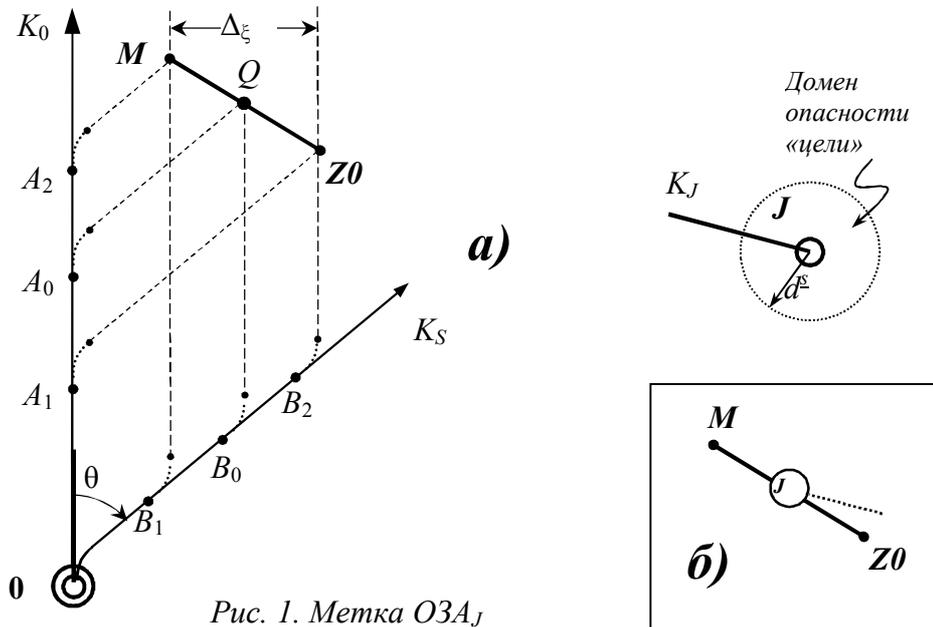


Рис. 1. Метка OZA_J

Метка MZ соответствует заданной дистанции кратчайшего сближения ($DCPA^S$ или d^s) и выбранному углу θ В-маневра. Курс уклонения вправо при таком угле θ обозначим K_S , а влево - K_P . На рис. 1 показана метка OZA_J для смещения судна оператора вправо. На этом рисунке K_J - курс «цели»; K_0 - исходный курс судна оператора; Δ_ξ - интервал опасных смещений при В-маневре с заданным углом θ .

Определяющими элементами метки OZA_J служат точки A_1, A_2, B_1, B_2 . Первые две из них являются точками на линии пути судна оператора, в которых начало изменения курса на угол θ приводит к расхождению с «целью» на дистанции d^s . На таком же расстоянии суда пройдут друг от друга, когда начало возвращения с линии уклонения к прежнему курсу проведено СО в точках B_1, B_2 . Отрезок A_1A_2 характеризует диапазон опасных курсов уклонения.

Если судно оператора начнет изменение курса на угол θ в точке A_0 или инициирует возвращение к прежнему курсу в точке B_0 , то это приведет к столкновению с «целью» в точке Q . Таким образом, Q является точкой возможного столкновения судна оператора с «целью» при В-маневре. Точки A_0, B_0 делят соответственно отрезки A_1A_2 и B_1B_2 пополам. Точка Q возможного столкновения с «целью» делит метку пополам. Чтобы метку OZA_J легче было идентифицировать, в ее центре в кружочке показывается номер «цели», к которой эта метка относится, и точечный отрезок, указывающий направление на эту «цель» (рис. 1,б). В памяти бортовых систем

предупреждения столкновений (СПС) все метки ОЗА₁ следует представлять координатами их концов M , Z .

Будем считать, что траектория судна при повороте является дугой окружности с радиусом R_M , соответствующем углу перекладки руля (рис. 2). Расстояние S_θ , проходимое СО при изменении курса на угол θ , и время t_θ поворота судна можно найти по формулам

$$S_\theta = R_M \cdot \theta; \quad t_\theta = S_\theta / V; \quad (1)$$

где V - скорость судна.

Дистанция S_R до точки пересечения курсов, на которой надо начать поворот, и время t_R прохождения этой дистанции со скоростью V равны

$$S_R = R_M \cdot \tan \frac{\theta}{2}; \quad t_R = S_R / V. \quad (2)$$

Для упрощения расчетов криволинейный участок движения судна при повороте (дугу окружности) заменим эквивалентным по времени прямым отрезком S_E . Такой способ учета инерционности судна оператора при решении задач предупреждения столкновений называется «методом промежуточного курса» [2].

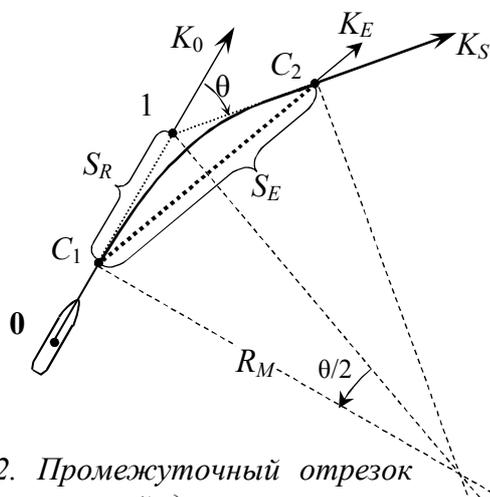


Рис. 2. Промежуточный отрезок SE , заменяющий дугу траектории поворота на угол θ

Длину промежуточного отрезка, курс и скорость СО на нем можно определить по формулам

$$S_E = 2R_M \cdot \sin \frac{\theta}{2}; \quad K_E = 0.5 \cdot (K_0 + K_S); \quad V_E = S_E / t_\theta. \quad (3)$$

Рассмотрим алгоритм расчета метки OZ_A на примере В-маневра вправо в ситуации пересечения курсов. Схема сближения судов представлена в ориентированной по норду системе координат XOY (рис. 3). Начало этой системы связано с точкой земной поверхности, ось OX направлена на север, а ось OY - на восток.

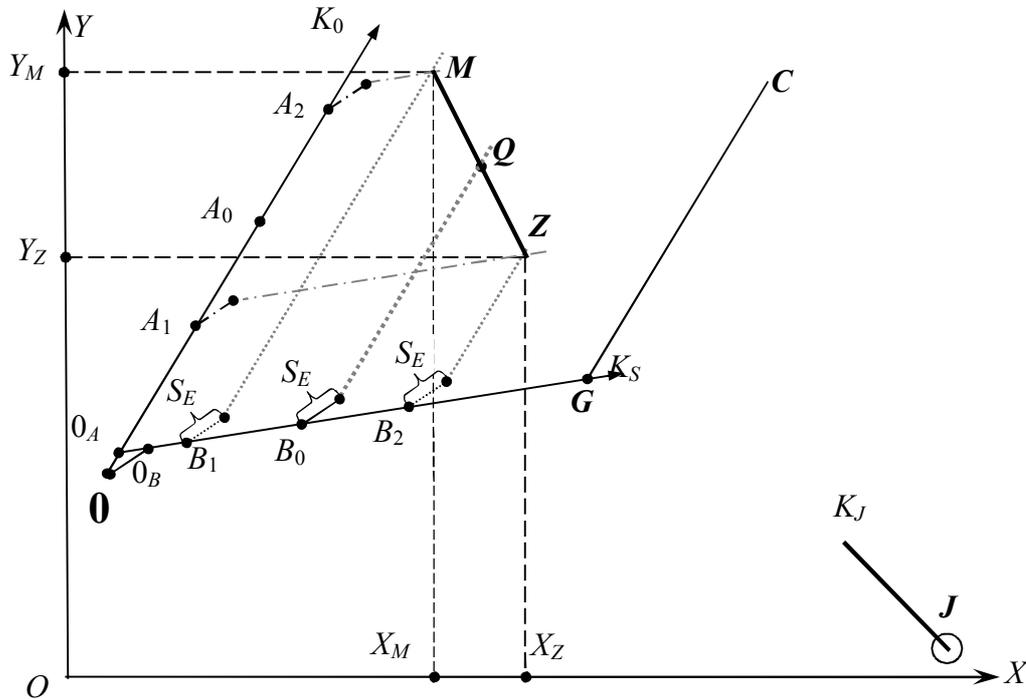


Рис. 3. Характеристика истинного движения судна оператора при В-маневре

На рисунке обозначено:

K_0, V - курс и скорость судна оператора перед маневром;

$K_S = K_0 + \theta$ - курс уклонения вправо;

K_J, V_J - курс и скорость «цели» J ;

A_1, A_2 - точки начала поворота с курса K_0 на курс K_S для расхождения с «целью» на дистанции d^s ;

B_1, B_2 - точки начала возвращения с курса K_S к прежнему курсу K_0 для расхождения с «целью» на дистанции d^s ;

MZ - метка OZ_A , порождаемая «целью» J ;

Q, A_0, B_0 - центр метки и точки начала поворота с курса K_0 на курс K_S и возвращения с курса K_S к прежнему курсу K_0 для сближения с «целью» J вплотную;

S_E - промежуточный отрезок, заменяющий траекторию поворота;

Δ_ξ - интервал смещений от планового пути, приводящих к чрезмерному сближению с «целью»;

ГС - граница безопасной для движения и маневров области (ОДМ).

ОДМ представляется в виде соприкасающихся по линии пути СО правой и левой полос. Внешние границы этих полос отсекают опасные в навигационном отношении воды. На рисунке показана только правая полоса.

Метка ОЗА_J полностью определяется координатами своих концов – М, Z. Для их нахождения рассмотрим показанную на рис. 3 ситуацию в относительном движении (рис. 4, 5) в системе координат $хоу$. Начало этой системы связано с местом «цели», ось $ох$ направлена на север, а ось $оу$ - на восток.

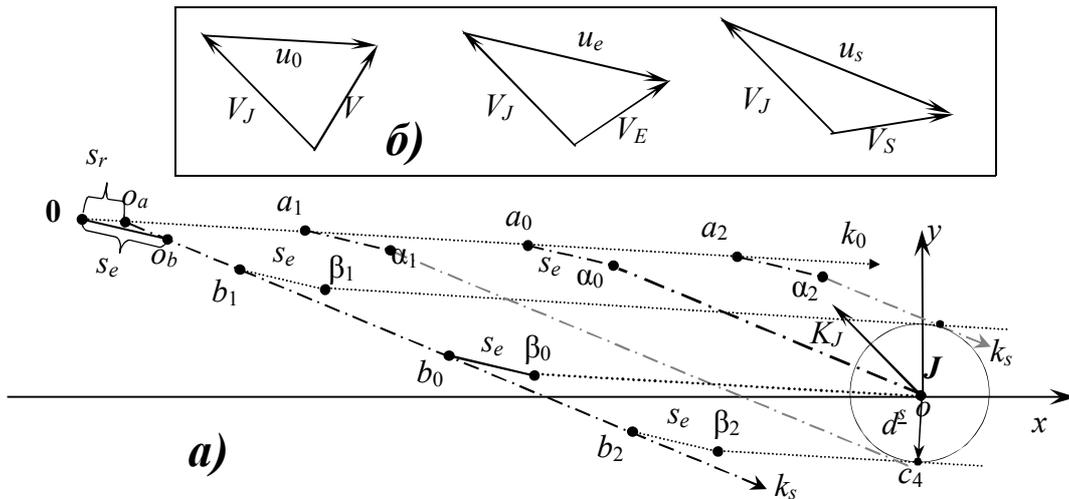


Рис. 4. Перемещения судна оператора относительно «цели» при В-маневре

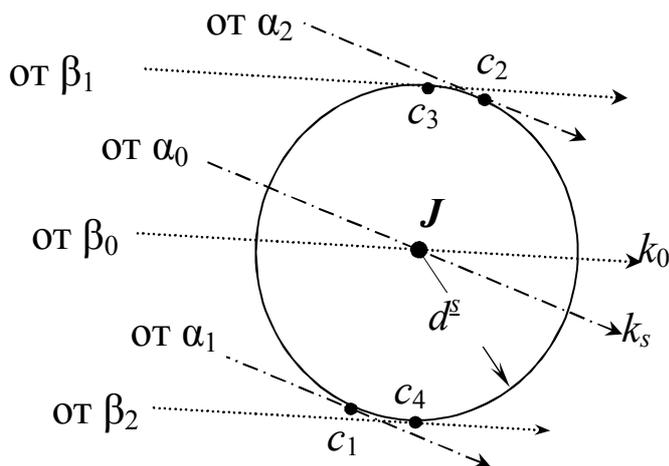


Рис. 5. Пояснение к рис. 4

На рисунках 4 и 5 обозначено:

$k_0, u_0; k_s, u_s; k_e, u_e$ – курс и скорость относительно «цели» судна оператора, следующего соответственно курсом K_0, K_s, K_e ;

a_0, a_1, a_2 и b_0, b_1, b_2 – точки на ЛОД судна оператора, соответствующие точкам A_0, A_1, A_2 и B_0, B_1, B_2 на рис. 3;

c_1, c_2 и c_3, c_4 – точки касания линий курсов k_0 и k_s границы домена опасности «цели»;

s_e – соответствующий S_E отрезок относительного движения.

Алгоритм вычисления положения метки ОЗА_{JB} с учетом инерционности судна оператора включает следующие операции.

1) Находятся расстояние S_θ и время t_θ движения СО при повороте на угол θ по формулам (1).

2) Криволинейные участки поворотов СО заменяется эквивалентными по времени прямыми отрезками длиной S_E . Длина промежуточного отрезка, курс и скорость СО на нем находятся по формулам (2).

3) Решением «треугольников скоростей» (рис. 4б) определяется относительный курс и скорость судна оператора:

k_0, u_0 – для движения судна оператора курсом K_0 и скоростью V ;

k_s, u_s – для движения судна оператора курсом K_s и скоростью V ;

k_e, u_e – для движения судна оператора курсом K_E и скоростью V_E .

Расчет производится по формулам

$$\left. \begin{aligned} u_{ix} &= V_i \cdot \sin K_i - V_j \cdot \sin K_j \\ u_{iy} &= V_i \cdot \cos K_i - V_j \cdot \cos K_j \end{aligned} \right\}, \quad (4)$$

$$\left. \begin{aligned} u_i &= \sqrt{u_{ix}^2 + u_{iy}^2} \\ k_i &= \arcsin(u_{ix} / u_i) \end{aligned} \right\}, \quad (5)$$

где u_{ix}, u_{iy} – составляющие скорости u_i по осям ox и oy , где $i=0, s, e$.

4) По u_0 и t_R определяется дистанция s_r (см. рис. 4,а)

$$s_r = u_0 \cdot t_R. \quad (6)$$

5) По u_e и t_θ вычисляется эквивалентное расстояние s_e , которое за время поворота проходит судно оператора по отношению к «цели»

$$s_e = u_e \cdot t_\theta. \quad (7)$$

5) Определяются интервалы времени t_{A1} , t_{A2} перемещения судна оператора от места O_A соответственно до точек A_1 , A_2 . Эти значения находятся из систем уравнений (5), (6) с двумя неизвестными. Искомыми величинами в первой системе являются t_{A1} и время τ_1 движения ОС по отрезку α_1, c_1 . В системе уравнений (6) неизвестны t_{A2} и τ_2 , где τ_2 - время перемещения ОС по отрезку α_2, c_2 .

$$\left. \begin{aligned} u_{sx}t_{A1} + u_{0x}\tau_1 &= X_J - X_0 + d^s \cdot \cos k_0 - s_{ex} - s_{rx} \\ u_{sy}t_{A1} + u_{0y}\tau_1 &= Y_J - Y_0 - d^s \cdot \sin k_0 - s_{ey} - s_{ry} \end{aligned} \right\}, \quad (8)$$

$$\left. \begin{aligned} u_{sx}t_{A2} + u_{0x}\tau_2 &= X_J - X_0 - d^s \cdot \cos k_0 - s_{ex} - s_{rx} \\ u_{sy}t_{A2} + u_{0y}\tau_2 &= Y_J - Y_0 + d^s \cdot \sin k_0 - s_{ey} - s_{ry} \end{aligned} \right\}. \quad (9)$$

Эти системы отражают (см. рис. 4, 5) составляющие относительных путей $O, o_a, a_1, \alpha_1, c_1$ и $O, o_a, a_2, \alpha_2, c_2$ судна оператора для расхождения с «целью» на расстоянии d^s .

Аналогично находятся промежутки времени t_{B1} , t_{B2} следования судна оператора от места O_B соответственно до точек B_1 , B_2 (по линии курса K_S) из систем уравнений (8), (9), где τ_3 , τ_4 - соответственно время движения ОС по отрезкам β_1, c_3 и β_2, c_4 .

$$\left. \begin{aligned} u_{sx}t_{B1} + u_{0x}\tau_3 &= X_J - X_0 - d^s \cdot \cos k_0 - 2 \cdot s_{ex} \\ u_{sy}t_{B1} + u_{0y}\tau_3 &= Y_J - Y_0 + d^s \cdot \sin k_0 - 2 \cdot s_{ey} \end{aligned} \right\}, \quad (10)$$

$$\left. \begin{aligned} u_{sx}t_{B2} + u_{0x}\tau_4 &= X_J - X_0 + d^s \cdot \cos k_0 - 2 \cdot s_{ex} \\ u_{sy}t_{B2} + u_{0y}\tau_4 &= Y_J - Y_0 - d^s \cdot \sin k_0 - 2 \cdot s_{ey} \end{aligned} \right\}. \quad (11)$$

Эти системы составляются при рассмотрении относительного перемещения судна оператора по пути $O, o_b, b_1, \beta_1, c_3$ и $O, o_b, b_2, \beta_2, c_4$ (см. рис. 4, 5) для расхождения СО с «целью» на расстоянии d^s .

6) Определяются координаты концов M , Z метки ОЗА_{JB}

$$\left. \begin{aligned} X_M &= X_0 + 2 \cdot S_{EX} + V \cdot t_{B1} \cdot \sin K_S + V \cdot t_{A2} \cdot \sin K_0 \\ Y_M &= Y_0 + 2 \cdot S_{EY} + V \cdot t_{B1} \cdot \cos K_S + V \cdot t_{A2} \cdot \cos K_0 \end{aligned} \right\}, \quad (12)$$

$$\left. \begin{aligned} X_Z &= X_0 + 2 \cdot S_{EX} + V \cdot t_{B2} \cdot \sin K_S + V \cdot t_{A1} \cdot \sin K_0 \\ Y_Z &= Y_0 + 2 \cdot S_{EY} + V \cdot t_{B2} \cdot \cos K_S + V \cdot t_{A1} \cdot \cos K_0 \end{aligned} \right\}. \quad (13)$$

7) По этим значениям выделяются для отображения на экране метки, попавшие в ОДМ, и находятся координаты точки Q (см. рис. 3)

$$X_Q = (X_M + X_Z)/2, \quad Y_Q = (Y_M + Y_Z)/2. \quad (14)$$

Значения X_M , Y_M , X_Q , Y_Q , X_Z , Y_Z используются в СПС для представления метки на экране дисплея и при расчете ДСРА.

Выводы и перспективы дальнейшей работы по данному направлению

Полученный алгоритм позволяет вычислять метки порождаемых «целями» опасных при В-маневре зон акваторий с учетом динамики судна. Это повышает точность выбранных СО по этим меткам В-маневров и оценку опасности встречных судов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Вагущенко Л.Л. Поддержка решений по расхождению с судами / Л.Л.Вагущенко, А.Л. Вагущенко. – Одесса: Феникс, 2010. – 296 с.
2. Демин С.И. Управление судном: учебник (для вузов) / С.И. Демин, Е.И.Жуков, Н.А. Кубачев и др.; под ред. В.И. Снопкова. – М.: Транспорт. 1991. – 359 с.
3. Мальцев А.С. Маневрирование судов при расхождении /А. С. Мальцев. – Одесса: Морской тренажерный центр, 2002. – 208 с.
4. Цымбал Н.Н. Гибкие стратегии расхождения судов / Н.Н. Цымбал, И.А.Бурмака, Е.Е. Тюпиков. – Одесса: КП ОГТ, 2007. – 424 с.