

А. И. Бражный

## **Механизм выбора приоритетных альтернатив и последовательности решений для обеспечения навигационной безопасности буксирного каравана**

В статье рассмотрены вопросы навигационной безопасности движения буксируемого объекта и буксировщика. Представлены методы выбора альтернатив лицами, принимающими решения (ЛПР) по управлению безопасностью буксирного каравана. Приведены примеры состояний навигационной безопасности, их взаимосвязи эксплуатационного, критического и аварийного характера применительно к заданной полосе положения, предложена последовательность формирования алгоритма действий с учетом оценки возможных потерь для обеспечения устойчивости буксирной операции. Целью работы является исследование и разработка последовательности логических заключений для формирования механизма принятия корректирующих действий судоводительским составом при выходе буксирного каравана из состояния устойчивой навигационной безопасности для его возвращения к исходным параметрам устойчивого движения. Для оценки навигационных рисков использован метод анализа функции рисков с дальнейшим выбором управлений, синтезированных для процесса буксировки, учитывая возможные реакции "человеческого элемента". Для расчетов использованы общеизвестные в теории вероятности и математической статистике методы. Построена итерационная математическая модель буксирного каравана с рассмотрением апостериорного распределения параметров фазовых координат каравана при заданных наблюдениях. Исследована вероятность возникновения ресурсных потерь при выборе оптимальной альтернативы. Установлено, что при выборе и принятии однократного решения в условиях риска среди альтернатив с потерями всегда можно найти такую альтернативу, которая способна обеспечить при управлении состоянием навигационной безопасности каравана уменьшение вероятности возникновения больших потерь. При управлении навигационным состоянием буксирного каравана следует выбирать оптимальную альтернативу, сводящую к минимуму вероятность максимальных затрат, а затем на ее базе выбирать при неполной информированности ЛПР оптимальную последовательность управлений, которая будет в свою очередь минимизировать среднюю функцию потерь.

**Ключевые слова:** буксирный караван, условия риска, выбор альтернативы, средняя функция потерь.

### **Введение**

В современных условиях при постоянном возрастании интенсивности движения морских судов, увеличении тоннажа морских перевозок и введении большинством прибрежных государств зон разделения движения судов перед судоводителями возникают дополнительные задачи по осуществлению навигации в условиях ограниченного водного пространства, что требует дополнительного рассмотрения сложившейся в мировой практике ситуации [1; 2]. Возрастает необходимость изучения процессов поддержания навигационной безопасности с точки зрения удержания морских судов в четко определенных границах заданной полосы движения, а в более широком толковании – полосы безопасности, что делает тему исследования остроактуальной и своевременной.

В рамках модели появления навигационных опасностей и решения задачи по разрешению проблемных ситуаций, возникающих при буксировках маломореходных объектов, можно сформулировать общие представления о взаимосвязи трех основных состояний буксирного каравана и составить модель этих взаимосвязей [3]. В общем случае можно рассмотреть один наиболее характерный подход к составлению моделей таких взаимосвязей при выборе и принятии однократного решения в условиях риска, среди альтернатив с потерями возможно найти такую альтернативу, которая способна обеспечить при управлении состоянием навигационной безопасности каравана уменьшение вероятностей возникновения больших потерь. Выбор такой альтернативы должен предусматривать ее последующую реализацию [4].

### **Материалы и методы**

В работе применен анализ модели наблюдения для буксирного каравана в условиях неполной информации судоводителя, основанный на минимизации математического ожидания функции потерь для выбора предпочтительных управлений. Для оценки навигационных рисков использованы общеизвестные в теории вероятности и математической статистике методы.

Использован метод исследования свойства устойчивости навигационной безопасности буксировочной операции, описан критерий выбора альтернативы, значительно снижающей ресурсные потери при принятии ЛПР действий в условиях неполной информированности для возвращения буксирного каравана в заданную полосу положения с сохранением устойчивого состояния безопасности. Построена итерационная математическая модель буксирного каравана и рассмотрен процесс апостериорного распределения параметров фазовых координат каравана при заданных наблюдениях.

### Результаты и обсуждение

В качестве основы построения модели используем предположение, в соответствии с которым основное состояние системы буксировки является навигационно-безопасным. В этом состоянии буксируемый объект располагается в кильватерной струе буксировщика без рыскания и рывков буксирной линии. Выход буксируемого объекта на границы заданной полосы с присутствием существенного рыскания можно рассматривать как критически-опасное состояние [5].

Если же буксируемый объект вышел за пределы полосы положения, то состояние каравана следует рассматривать уже как аварийно-опасное. При этих допущениях относительно состояния буксирного каравана, взаимосвязи эксплуатационного, критического и аварийного состояний этой системы общее состояние несения вахты можно представить в виде направленного графа с циклической структурой вида  $G(S, W)$ , где  $S$  – вершины графа, а  $W$  – ребра этого графа (рис.).

Основным устойчивым состоянием, отвечающим условиям навигационной безопасности каравана, является эксплуатационное состояние, совпадающее с вершиной графа  $S_1$ . В этом состоянии действия факторов опасности незначительны и сбалансированы действиями системы буксировки на стадиях профилактики и предупреждения аварийности. Свойство устойчивости буксирной операции зафиксировано в вершине графа  $S_1$  циклом (рис.).

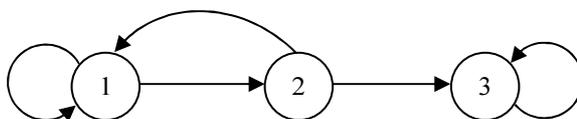


Рис. Свойство устойчивости буксирной операции  
Fig. The property of towing operation stability

Если при выполнении буксировочной операции в буксирной системе действия факторов опасности создают реальную угрозу операции, и такие действия не могут быть сбалансированы действиями в этой системе на стадиях профилактики и предупреждения, то возникает неустойчивое (двойственное) критическое состояние, совпадающее с вершиной графа  $S_2$ . Это состояние неустойчиво, поскольку с одной стороны способно при принятии организационно-технических мероприятий вернуться в устойчивое эксплуатационное состояние  $S_1$  (критичность без последствий), а с другой стороны, когда принятые меры неадекватны действиям факторов опасности, – превратиться в аварийное состояние, совпадающее с вершиной графа  $S_3$  (критичность с последствиями).

Критическое состояние буксирной системы характеризуется реальным или кажущимся нарушением ее функционирования, а также разрушением отдельных ее элементов. Естественно, что в случае кажущегося нарушения функционирования или кажущегося разрушения элементов системы буксировки возможно возвращение этой системы в состояние  $S_1$ , обеспечивающее навигационную безопасность каравана.

При истинном разрушении элементов или истинном нарушении режима функционирования буксирной системы аварийное состояние каравана становится необратимым. Свойство необратимости и устойчивости истинного аварийного состояния каравана в эволюционной модели взаимосвязи (рис.) закреплено циклом при вершине графа  $S_3$ . В истинном аварийном состоянии буксирного каравана необходимо реагировать на разрушительные действия опасных факторов, но лишь в плане локализации, а в последующем и минимизации последствий этих действий.

Из проблемы, очерченной графом (рис.), возникает необходимость в выборе и принятии однократного решения при риске осуществления выбора исключительно среди альтернатив с потерями. Естественно, что ЛПР целесообразно использовать выбор альтернативы по такому критерию, который обеспечивал бы, насколько это возможно, уменьшение вероятностей возникновения более существенных потерь [6].

В рамках данного подхода ниже дается описание выбора оптимальной альтернативы из их множества, заданного следующим образом:

$$A_i = (l_{i1}, p_{i1}; \dots; l_{ij}, p_{ij}; \dots), i = 1, 2, \dots, n, \quad (1)$$

где  $l_{ij}$  – величина потерь, возникающих при  $j$ -м исходе альтернативы  $A_i$ ;  $p_{ij}$  – вероятность  $j$ -го исхода альтернативы  $A_i$ .

Наиболее полную информацию относительно вероятностей возникновения больших потерь может содержать функция, записанная так:

$$p_i(l) = P(\xi_i \geq l),$$

где  $\xi_i$  – вероятностная переменная, выражающая величину потерь в случае реализации альтернативы  $A_i$ ;  $l$  – определенное значение величины потерь.

Уменьшение, насколько это возможно, вероятностей возникновения больших потерь при поддержании навигационной безопасности буксирного каравана, можно осуществить в том случае, если ЛППР выбирает такую альтернативу  $A_i$  из (1), при которой было бы истинно следующее высказывание:

$$\forall l \in L \quad p(l) = \min_i p_i(l), \quad (2)$$

где  $L$  – область интересующих ЛППР значений  $l$ .

Для реализации критерия предположим, что вероятностные переменные, выражающие величину потерь в случае выбора альтернативы  $A_i$ , соответствуют следующим высказываниям:

$$\forall i, j \in I \quad (D_1(i, j) \vee D_2(i, j) \vee D_3(i, j)), \quad (3)$$

где

$$D_1(i, j): \forall l \in L \text{ имеет место } p_i(l) \geq p_j(l),$$

$$D_2(i, j): \forall l \in L \text{ имеет место } p_i(l) \leq p_j(l),$$

$$D_3(i, j): \forall l \in L \text{ имеет место } p_i(l) = p_j(l).$$

Тогда при выполнении условий (3) критерий (2) может быть преобразован к виду

$$\forall l \in L \quad p_0(l) = \min_i p_i(l), \quad (4)$$

а выбранная ЛППР альтернатива  $A_i$  является оптимальной.

Помимо требований, накладываемых на функцию  $p_i(l)$  и необходимых для реализации критерия (4), эта функция также должна отвечать условиям, вытекающим из ее определения, а именно:

$$0 \leq p_i(l) \leq 1. \quad (5)$$

И если  $l_A > l_B$ , то

$$p(l_A) \leq p(l_B). \quad (6)$$

Следовательно, критерий выбора наименее опасной и оптимальной альтернативы (4) в случае однократных решений при риске возможен, если существуют функции  $p_i(l)$ , которые удовлетворяют требованиям (3), (5) и (6). Тогда сформулируем условия, при которых возможно существование функций  $p_i(l)$ . Исходя из достаточно общих соображений функции  $p_i(l) = \pi(l, h_i)$ , где  $h_i$  – величина параметра  $h$ , должны подчиняться следующим требованиям. Функции  $p_i(l)$  должны принадлежать такому классу  $G$  определенных на оси  $l$  функций  $\pi(l, h)$  с параметром  $h$ , при котором истинна дизъюнкция вида

$$F_1(\pi) \vee F_2(\pi),$$

где

$$F_1(\pi): \text{ если } h_a > h_b, \text{ то } \forall l \in L \pi(l, h_a) \geq \pi(l, h_b),$$

$$F_2(\pi): \text{ если } h_a > h_b, \text{ то } \forall l \in L \pi(l, h_a) \leq \pi(l, h_b).$$

Кроме того, функции из класса  $G$  должны быть определены на интервале  $0 \leq \pi(l, h) \leq 1$  так, чтобы при  $l_a > l_b$  выполнялись условия

$$\pi(l_a, h) \leq \pi(l_b, h).$$

$$\forall l \in L \quad \pi(l, h_i) - p_i(l) = \min[\pi(l, h) - p_i(l)] \quad h \in H_i,$$

если  $H_i: \{h \mid l \in L \pi(l, h) \geq p_i(l)\}$ .

Таким образом, при выборе и принятии однократного решения в условиях риска среди альтернатив с потерями возможно найти такую альтернативу, которая способна обеспечить уменьшение вероятностей возникновения больших потерь при управлении состоянием навигационной безопасности каравана. Выбор такой альтернативы должен предусматривать ее последующую реализацию. Однако при реализации альтернативы с малыми потерями можно принять то, что ЛППР не обладает полной информацией о состоянии навигационной безопасности буксирного каравана [7]. Поэтому далее рассмотрим синтез механизма выбора "человеческим элементом" последовательности управлений навигационным состоянием каравана на базе выбранной альтернативы с минимальными потерями при неполной априорной информации о параметрах движения

этого каравана и плотностях распределения ошибок "человеческого элемента", которые сопутствуют функционированию этого элемента в буксирной системе [8].

Такой механизм выбора управлений, синтезированный для систем буксировки, можно отнести к классу параметрических адаптивных систем. В основу синтеза механизма выбора управлений при существенно неполной информации могут быть положены статистические методы управления, основанные на апостериорных статистических выводах. Механизмы выбора управлений, основанные на апостериорных статистических выводах, позволяют значительно сократить объем обработки данных и расширить возможности поиска последовательных оптимальных управлений буксирным караваном в условиях высокой степени неопределенности.

Пусть буксирный караван как объект наблюдения и уравнения определяется математической итерационной моделью вида

$$x_{n+1} = F(x_n, u_n, \xi_n, a, b), \quad y = G(x_n, \eta_n, c), \quad (7)$$

где  $x_n$  – параметры фазовых координат буксирного каравана;  $\eta_n$  и  $\xi_n$  – независимые ошибки "человеческого элемента" при оценке параметров каравана и наблюдений за ним;  $u_n$  – управления, используемые ЛППР для обеспечения навигационной безопасности каравана;  $a, b, c$  – неизвестные параметры, характеризующие эксплуатируемую модель буксирного каравана и принятые модели ошибок "человеческого элемента".

Выбор предпочтительных управлений в условиях неполной информации для каравана и модели его наблюдения (7) должен минимизировать математическое ожидание функции потерь  $W(x_n, u_{n-1})$  по апостериорному распределению вероятности фазовых координат буксирного каравана при выполненных наблюдениях  $y^{n-1}$  вида

$$\gamma_k = \sum_{i=k}^N EW(x_i, u_{i-1}), \quad \text{где } i = 1 \div N,$$

где

$$EW(x_n, u_{n-1}) = \int W(x_n, u_{n-1}) p^*(x_n | u_{n-1}, y^{n-1}) p(u_{n-1} | y^{n-1}) dv(x_n) du_{n-1},$$

$$y^{n-1} = (y_1, y_2, \dots, y_{n-1}),$$

а  $p^*(x_n | u_{n-1}, y^{n-1})$  – апостериорное распределение параметров фазовых координат каравана при заданных наблюдениях  $y^{n-1}$ .

Апостериорное распределение ненаблюдаемой переменной величины  $x_n$ , в отличие от классического определения апостериорной плотности по формуле Байеса, должно определяться без использования априорных распределений по относительно инвариантной мере, связанной с некоторой группой преобразований [9]. В данном случае апостериорные оценки  $\langle x_n \rangle$  минимизируют апостериорные риски и выраженные как несобственные байесовские оценки для инвариантных априорных вероятностных мер [10].

Рассмотрим возможность оценки апостериорной плотности вероятности параметров  $x_n$  процесса управления караваном (7) при наблюдениях  $y^n$ , обозначая через  $Y$  выборочное пространство наблюдений, через  $X$  – пространство параметров, а через  $G_y$  и  $G_x$  – группы преобразований на множествах  $Y$  и  $X$  соответственно. Пусть  $P(y^n | x^n)$  – семейство распределений на  $Y$  при некотором значении параметра  $x^n$ . Формально апостериорное распределение можно получить из формулы Байеса при равномерном априорном распределении вида

$$p^*(x^n | y^n) = \{p(x^n) p(y^n | x^n)\} / \int p(x^n) p(y^n | x^n) dv(x^n) = p(y^n | x^n) / \int p(y^n | x^n) dv(x^n),$$

а если дополнительно вероятность  $\nu(x^n)$  выбрана так, чтобы имело место равенство

$$\int p(y^n | x^n) dv(x^n) = 1,$$

то можно найти отношение, записанное как выражение

$$p^*(x^n | y^n) = p(y^n | x^n). \quad (8)$$

Рассмотрим возможный процесс определения апостериорной плотности  $p^*(x^n | y^n)$ , для чего используя (8) и применяя правило умножения для плотностей, получим

$$p^*(x^n | y^n) = p(y^n | x^n) = p(y_n, y^{n-1} | x_n) = p(y_n | y^{n-1}, x^n) p(y^{n-1} | x^n).$$

Второй сомножитель полученного выражения представим в следующем виде

$$p(y^{n-1}|x^n) = kp^*(x^n|y^{n-1}) = kp^*(x_n|x^{n-1}, y^{n-1})p^*(x^{n-1}|y^{n-1}), \quad (9)$$

где  $k \sim \text{const}$ .

Подтвердим правомерность записанного выражения (9). Действительно, если имеет силу последовательность равенств

$$\begin{aligned} p^*(x^n|y^{n-1}) &= p^*(x_n|x^{n-1}, y^{n-1})p^*(x^{n-1}|y^{n-1}) = \\ &= \{p(x^n|y^{n-1})p^*(x^{n-1}|y^{n-1})\} / p^*(x^{n-1}, y^{n-1}) = \\ &= \{p(x^n, y^{n-1})p(x^{n-1}|y^{n-1})\} / \{p(x^{n-1}, y^{n-1})p(x^{n-1})\} = \\ &= \{p(y^{n-1}|x^n)p(x^n)\} / p(x^{n-1}), \end{aligned}$$

то, учитывая, что  $p(x^n)$  соответствует равномерному распределению, найдем

$$p(x^n) / p(x^{n-1}) = 1/k,$$

по крайней мере, для области определения  $x^n$ .

Последнее отношение подчеркивает справедливость выражения (9), в силу чего, подставляя выражение (5) в формулу (4), получим рекуррентную зависимость для определения плотности

$$p^*(x^n, y^n) = kp(y_n|y^{n-1}, x^n)p^*(x^{n-1}|y^{n-1})p^*(x_n|x^{n-1}, y^{n-1}). \quad (10)$$

Перейдем от значения  $x^n$  к последнему значению  $x_n$ , учитывая следующее равенство:

$$p^*(x_n, y^n) = \int p^*(x^n, y^n) dv(x^{n-1}). \quad (11)$$

Для этой цели первый сомножитель в выражении (8) представим:

$$p(y_n|y^{n-1}, x^n) = p(y_n|y^{n-1}, x_n)$$

и из выражений (8), (9) и (11) найдем

$$p^*(x_n, y^n) = kp(y_n|y^{n-1}, x^n) \int p^*(x_n x_{n-1}|y^{n-1}) dv(x_{n-1}),$$

где

$$p^*(x_n x_{n-1}|y^{n-1}) = \int p^*(x^n|y^{n-1}) dv(x^{n-2}).$$

Тогда окончательно получим:

$$p^*(x_n, y^n) = kp(y_n|y^{n-1}, x_n) \int p^*(x_{n-1}|y^{n-1}) p^*(x_n|x_{n-1}, y^{n-1}) dv(x_{n-1}). \quad (12)$$

Обычно апостериорная плотность  $p^*(x^n|y^n)$  как элемент семейства распределений  $P(y^n|x^n)$  может быть определена по теореме Радона – Никодима с вероятностью, записанной как

$$P^*(x^n|y^n) = \int p^*(x^n|y^n) dv(x^n),$$

где  $v(x^n)$  – инвариантная относительно некоторой группы преобразований вероятность, то есть, если  $G_x$  – группа преобразований на  $X$ , то  $v(x^n g_x) = v(x^n)$ , при  $g_x \in G_x$ .

Апостериорное распределение  $P^*(x^n|y^n)$  параметров  $x^n$  управляемого процесса буксировки является вероятностью попадания величин  $x^n$  в некую принятую область  $Q$  при наблюдаемых величинах  $y^n$ . При синтезе последовательности оптимальных управлений основная трудность в условиях апостериорной неопределенности состоит в вычислении средней функции потерь  $\gamma_n^{opt}$ , что, в свою очередь, связано с рассмотренной выше проблемой вычисления апостериорных плотностей и оценкой апостериорных рисков. Как показано в работе [11], при достаточно общих ограничениях апостериорные оценки состояния процесса  $\langle x_n \rangle$ , при идентифицированном с помощью рекуррентного выражения (12) апостериорном распределении величин  $p^*(x_n|y^n)$ , являются оптимальными в классе минимаксных оценок. Поэтому можно предположить, что вероятностные приоритеты

при выборе управлений  $u_n$  в реализуемой последовательности будут нерандомизированными и отвечать условию

$$p(u_{n-1} | y^{n-1}) = \delta(u_{n-1}, u_{n-1}^{opt}),$$

где  $u_{n-1}^{opt}$  – оптимальное управление.

Если далее привлечь допущение о нерандомизированности вероятностных приоритетов, то используя принципы оптимальности [4], можно получить функциональное уравнение, записанное в виде

$$\gamma_n^{opt} = \min_{u_{n-1}} \left[ \lambda_n + \int \gamma_{n-1}^{opt} p(y_n | y^{n-1}, u_{n-1}^{opt}) dy_n \right],$$

$$\lambda_n = \left[ \lambda_n + \int W(x_n, u_{n-1}) p^*(x_n | u_{n-1}, y^{n-1}) dv(x_n) \right],$$

где  $\gamma_n^{opt}$  – средняя функция потерь для последовательности оптимальных управлений, реализующих альтернативу с минимальными потерями, на предыдущих шагах от  $u_{n-1}^{opt}$  до  $u_{n-1}$ ;  $p^*(x_n | u_{n-1}, y^{n-1})$  – апостериорная плотность вероятности относительно меры  $v(x_n)$ .

### Заключение

Таким образом, при управлении навигационным состоянием буксирного каравана следует выбрать оптимальную альтернативу, минимизирующую стоимость потерь, а затем на ее базе, при неполной информированности ЛПР, – оптимальную последовательность управлений, которая будет в свою очередь минимизировать среднюю функцию потерь.

### Библиографический список

1. Некрасов С. Н., Ефимов К. И., Трененков Д. В. Навигационные риски буксировки судна в стесненных навигационных условиях // Вестник государственного университета морского и речного флота им. адмирала С. О. Макарова. 2014. № 6 (28). С. 13–19.
2. Смоленцев С. В. Проблема оценки навигационной ситуации в море // Вестник государственного университета морского и речного флота им. адмирала С. О. Макарова. 2015. № 6 (34). С. 23–28.
3. Формирование модели экспертной системы оценки безопасности движения судна / Д. А. Акмайкин, С. Ф. Клюева, А. Д. Москаленко, М. А. Москаленко // Транспортное дело России. 2015. № 6. С. 203–206.
4. Ермаков С. В. Анализ системы "судоводитель в ситуации" // Вестник МГТУ. 2013. Т. 16, № 4. С. 699–703.
5. Гроховский В. А., Меньшиков В. И., Агарков С. А. Алгоритм расчета параметров зоны навигационной безопасности с учетом текущей и априорной информации // Вестник государственного университета морского и речного флота им. адмирала С. О. Макарова. 2016. № 3 (37). С. 16–22.
6. Лохов С. С., Поздняков С. И., Меньшиков В. И. Критерий выбора оптимальной альтернативы по переводу судна из критического состояния в эксплуатационное состояние // Вестник МГТУ. 2011. Т. 14, № 4. С. 740–742.
7. Карташов С. В., Меньшиков В. И. Обеспечение безопасности мореплавания с учетом дополнительных источников навигационной информации и полной информированности судоводителя // Вестник АГТУ. Сер. Морская техника и технология. 2015. № 1. С. 32–36.
8. Бражный А. И. Навигационная безопасность плавания каравана по маршруту буксировки в условиях стационарности движения // Вестник МГТУ. 2015. Т. 18, № 4. С. 601–604.
9. Колмогоров А. Н. Об аналитических методах в теории вероятностей // Успехи математических наук. 1938. № 5. С. 5–41.
10. Феллер В. Введение в теорию вероятностей и ее приложения. М. : Мир, 1967. Т. 1, 2.
11. Зубов В. И. Теория оптимального управления. Л. : Судостроение, 1966. 351 с.

### References

1. Nekrasov S. N., Efimov K. I., Trenenkov D. V. Navigatsionnye riski buksirovki sudna v stesnennykh navigatsionnykh usloviyakh [Navigation risks of vessel towing in cramped navigation conditions] // Vestnik gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota im. admirala S. O. Makarova. 2014. N 6 (28). P. 13–19.
2. Smolentsev S. V. Problema otsenki navigatsionnoy situatsii v more [Problem of assessment of navigation situation in the sea] // Vestnik gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota im. admirala S. O. Makarova. 2015. N 6 (34). P. 23–28.
3. Formirovanie modeli ekspertnoy sistemy otsenki bezopasnosti dvizheniya sudna [Formation of model of expert system of vessel movement safety assessment] / D. A. Akmaykin, S. F. Klyueva, A. D. Moskalenko, M. A. Moskalenko // Transportnoe delo Rossii. 2015. N 6. P. 203–206.

4. Ermakov S. V. Analiz sistemy "sudovoditel v situatsii" [Analysis of the system "navigator in the situation"] // Vestnik MGTU. 2013. V. 16, N 4. P. 699–703.

5. Grohovskiy V. A., Menshikov V. I., Agarkov S. A. Algoritm rascheta parametrov zony navigatsionnoy bezopasnosti s uchetom tekushey i apriornoj informatsii [Algorithm for calculating the navigation security zone settings to reflect the current and prior information] // Vestnik gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota im. admirala S. O. Makarova. 2016. N 3 (37). P. 16–22.

6. Lohov S. S., Pozdnyakov S. I., Menshikov V. I. Kriteriy vybora optimalnoy alternativy po perevodu sudna iz kriticheskogo sostoyaniya v ekspluatatsionnoe sostoyanie [Criterion for selection of the optimal alternative to translate vessel from the critical state into operational status] // Vestnik MGTU. 2011. V. 14, N 4. P. 740–742.

7. Kartashov S. V., Menshikov V. I. Obespechenie bezopasnosti moreplavaniya s uchetom dopolnitelnyh istochnikov navigatsionnoy informatsii i polnoy informirovannosti sudovoditelya [Ensuring the safety of navigation taking into account other sources of navigation information and full awareness of the skipper] // Vestnik AGTU. Ser. Morskaya tehnika i tehnologiya. 2015. N 1. P. 32–36.

8. Brazhnyy A. I. Navigatsionnaya bezopasnost plavaniya karavana po marshrutu buksirovki v usloviyah statsionarnosti dvizheniya [Navigational safety along the route of the caravan towing in a stationary movement] // Vestnik MGTU. 2015. V. 18, N 4. P. 601–604.

9. Kolmogorov A. N. Ob analiticheskikh metodah v teorii veroyatnostey [On analytical methods in probability theory] // Uspehi matematicheskikh nauk. 1938. N 5. P. 5–41.

10. Feller V. Vvedenie v teoriyu veroyatnostey i ee prilozheniya [An introduction to probability theory and its applications]. M. : Mir, 1967. V. 1, 2.

11. Zubov V. I. Teoriya optimalnogo upravleniya [Theory of optimal control]. L. : Sudostroenie, 1966. 351 p.

#### Сведения об авторе

**Бражный Андрей Иванович** – ул. Спортивная, 13, г. Мурманск, Россия, 183010; Мурманский государственный технический университет, Морской институт, кафедра судовождения, аспирант, e-mail: brand-70@mail.ru

**Brazhnyy A. I.** – 13, Sportivnaya Str., Murmansk, Russia, 183010; Murmansk State Technical University, Marine Institute, Navigation Department, Ph.D. Student, e-mail: brand-70@mail.ru

A. I. Brazhnyy

**The mechanism of selecting priority options  
and sequence of solutions to ensure the safety  
of towing caravan navigation**

The paper considers navigational safety movement of the towed object and tugboat. Some methods of alternatives choice of decision-maker persons (DMP) to manage the safety of towing a caravan have been presented. Examples of navigation safety conditions, their operational relationship, critical and emergency character with respect to the predetermined position of the band have been given; the sequence of forming actions of the algorithm based on an assessment of possible losses for the sustainability of the towing operation has been proposed. The aim is to research and develop a sequence of logical conclusions for forming some mechanism to take corrective action when navigating the composition of the output of the towing caravan of navigation stable security situation for its return to the original settings of sustainable movement. To assess the risks of navigation functions the risk analysis method has been used, with further selection of management synthesized for towing process, taking into account the possible reaction of the "human element". For estimations well-known in the probability theory and mathematical statistics methods have been used. An iterative mathematical model of the tow caravan considering the posterior distribution of parameters caravan phase coordinates for the given cases has been built. The possibility of resource losses when choosing the optimal alternative has been investigated. It has been established that while selecting and adopting a single decision under risk, including alternatives to the losses, one can always find such an alternative which is able to ensure the management of the caravan navigational safety decreasing the probability of large losses. When operating the navigation state of towing caravan one should choose the optimal alternative that minimizes the possibility of the maximum cost, and then based on it to choose (with incomplete awareness of decision-makers) optimal sequence of controls which in turn will minimize the average loss function.

**Key words:** towing caravan, risk conditions, selection of alternative, average loss function.