

Запобігання та ліквідація надзвичайних ситуацій

УДК 656.61.08

С.А. Гайдук¹, П.П. Чабаненко²

¹Командование ВМС ВС Украины, Одесса

²в/ч А4566, Киев

ОЦЕНКА БЕЗОШИБОЧНОСТИ И БЫСТРОДЕЙСТВИЯ СТРУКТУР СПАСАТЕЛЬНЫХ ОПЕРАЦИЙ НА МОРЕ С ПАРАЛЛЕЛЬНОЙ ОРГАНИЗАЦИЕЙ РАБОТ

На основе анализа аварийности на море выявлено узкое место в планировании и управлении спасательными операциями – обоснование действий спасателей с параллельной организацией. Для оценки безошибочности и быстрого действия таких структурных подпроцессов предложены аналитические зависимости по характерным случаям.

Ключевые слова: аварийность, спасательная операция, параллельные работы, безошибочность, быстрое действие, предельные распределения.

Введение

Обсуждение проблемы. Анализ аварийности на море. Мировая экономика развивается. Вследствие этого быстро растёт объём грузовых и пассажирских перевозок, особенно морских. Темп роста мирового морского флота составляет примерно 1,5 раза за десятилетие. Только судов водоизмещением больше 500 регистровых тонн в настоящее время насчитывается ~ 500 тысяч. С другой стороны, в среднем в 1,3 раза увеличиваются за 10 лет потери в численности судов такого же водоизмещения. Каждый год из-за аварий и катастроф на море погибает около 2000 членов экипажей кораблей и судов с их пассажирами [5, 8].

Таким образом, налицо противоречие между закономерным ростом объёма морских перевозок и необходимостью обеспечения безопасности на море. Разрешение этого противоречия составляет проблему.

Для решения этой проблемы мировым сообществом осуществляется ряд проектов, в том числе нормативно-правовые:

– Международная конвенция по охране человеческой жизни на море (SOLAS-74);

– Международная конвенция по поиску и спасению на море (SAR-79), обязывающие национальные службы поиска и спасения координировать свои действия, объединяя усилия с другими странами в целях повышения эффективности решения задач обеспечения безопасности.

Интернациональная морская организация (ИМО) с момента своего существования считает одной из основных своих задач обеспечение безопасности на море и оказание помощи терпящим

бедствие [2, 11]. Создана и развивается Глобальная морская система связи и обеспечения безопасности мореплавания (ГМССБ).

Отмеченные и другие международные и национальные проекты не привели к существенному снижению аварийности на море, что свидетельствует о чрезвычайной важности проблемы. На судах украинских компаний положение даже ухудшилось (рис. 1 по данным Госфлотинспекции Украины).

Количество аварий

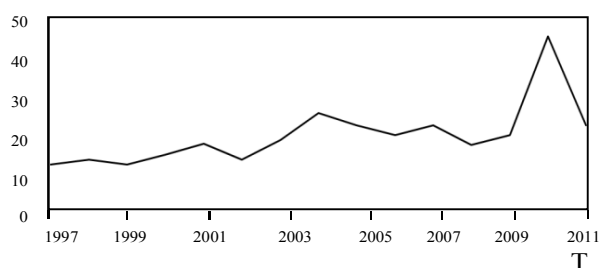


Рис. 1. Динамика аварийности судов украинских компаний

Заметим, что ~ 54% аварий происходит при плавании вблизи берега: посадки на мель, навалы на портовые сооружения, столкновения с другими судами [1]. По данным ИМО основные причины аварий и катастроф происходят вследствие ошибок человека (~ 74%). Приведём характерные примеры.

16.02.86 г. пассажирский круизный лайнер «Михаил Лермонтов» вблизи берегов Новой Зеландии на скорости 15 узлов дважды ударился дном о подводную каменистую мель в районе мыса Джексон, получил большую пробоину ниже ватерлинии.

Задраивание водонепроницаемых перегородок отсеков не остановило быстрого поступления воды. Возник опасный крен. Капитан направил теплоход на мель, но не довёл его до мели на 1 км из-за утраты хода. Пассажиры (408 ч-к), экипаж (330 ч-к) и лоцман спасены танкером «Tarihiko» и паромом «Arahuga». Через 20 минут после эвакуации лайнер затонул. Погиб 1 человек в отсеке, затопленном сразу после удара.

31.08.86 г. в акватории Новороссийской бухты в двух милях от мыса Дооб через 8 минут после столкновения с сухогрузом «Пётр Васёв» затонул пассажирский теплоход «Адмирал Нахимов». Погибли 423 человека.

13.01.12 г. в непосредственной близости от о. Джулио у побережья Тосканы один из крупнейших круизных теплоходов «Costa Concordia» при запоздалом повороте на скорости 15 узлов коснулся подводной скалы кормой. Через пробоину быстро затопило машинное отделение, и судно утратило ход и начало дрейфовать. Капитан не поставил его на якорь, и теплоход снова занесло на скалу, отсеки правого борта быстро заполнились водой, и судно перевернулось на этот борт. Было потеряно почти два часа для эвакуации людей, что привело к гибели 32 человек. Жертв было бы много больше, если бы не круглосуточная помощь жителей о. Джулио. Спустя полтора года на подъём «Costa Concordia» было затрачено около миллиарда долларов (рис. 2).



Рис. 2. Авария теплохода «Costa Concordia»

4.12.12 г. вблизи пролива Босфор в 12 милях от берега Турции в штормовом море затонул сухогруз прибрежного плавания «Волго-Балт 199». Авария развилась настолько стремительно, что экипаж не смог передать сигнал бедствия по радиостанции, но автоматически сработал аварийный радиобуй (АРБ) системы COSPAS-SARSAT. Быстроходные катера и вертолёты Турции по оповещению береговой станции этой сис-

темы немедленно начали спасательную операцию и подняли с поверхности моря членов экипажа сухогруза. В этой операции турецкая сторона задействовала 100 спасателей на море и 50 на берегу.

Эти и другие подобные случаи характерны следующим:

- судам и кораблям в аварийных ситуациях близи берега возможно оказание оперативной эффективной помощи силами и средствами ГМССБ и береговых служб;

- острый дефицит времени в этих случаях требует передачи и приёма сигнала бедствия без задержек с быстрым и безошибочным выполнением всех необходимых поисковых и спасательных действий;

- при этом следует ориентироваться на комплексное использование скоростных и устойчивых катеров, вертолётов, специальных спасательных судов, целенаправленно взаимодействующих со всеми средствами, вовлекаемыми в поисково-спасательную операцию;

- для успешного проведения спасательной операции необходимы: высокая техническая и оперативная готовность дежурных сил и средств, умения и навыки выполнения спасательных работ в сложных условиях с высокой степенью риска, образцовая координация взаимодействия всех спасателей.

Совершенствование таких сложных и важных для практики процессов невозможно без привлечения адекватных научных методов обоснования планирования и управления с учётом необходимости оценки качества выполнения задач с параллельной организацией работ.

Обоснование метода исследования. Анализ возможных подходов к исследованию процессов, сводимых к композициям (взаимосвязям) некоторых работ (действий, мероприятий, операций), свидетельствует в пользу сетевых методов: МКП, GERT, PERT, PERTI, E-сети, сети PRO и A-PRO; их версий. Они широко применяются для совершенствования процессов функционирования (ПФ) различных систем. Применительно к дискретно действующим организационно-техническим системам ВМС в [6] рекомендованы функциональные сети, обладающие определёнными преимуществами. В работе [10] изложены функциональные эргосети, выгодно отличающиеся от предшествующих методов, основанных на функционально-структурном подходе [3, 4, 6, 7], тем, что:

- наряду с наглядностью описания и удобством оценивания ПФ, набираемых из разработанных впрок типовых блоков операций (ТБО), оценивается не только безошибочность, но и безопасность (опасность) функционирования системы;

- учитывается не только установившийся режим функционирования системы (статика), но и переходной процесс (её динамика) при обучении операторов и их операционно-темповой напряжённости;

– расширен набор ТБО с формулами для вычисления вероятностей и моментов времени появления возможных исходов функционирования системы с учётом типов ошибок человека и отказов техники; частными случаями этих моделей являются известные унарные и бинарные сетевые модели.

Постановка задачи. Наличие аппарата описания, оценивания и синтеза разнообразных по операционным ПФ оперированием небольшого по численности набора типовых структурных фрагментов привлекательно и в отношении исследования спасательных операций на море.

Вместе с тем, в публикациях по функциональным сетям [3, 4, 6, 7] нет формул для вычисления математических ожиданий и дисперсий времени выполнения параллельных работ, в [6, 7] указаны только правила окончания:

– состязательной схемы (окончание по первой выполненной работе):

$$T_{\mu} = \min(T_1, T_2), \quad (1)$$

– схемы с ожиданием (окончание по последней выполненной работе):

$$T_M = \max(T_1, T_2). \quad (2)$$

Как выше показано, в спасательных операциях число n параллельных работ может быть больше и даже значительно больше двух, а прогноз по эффективности их выполнения необходим при планировании спасения людей. Поэтому актуальна задача оценки безошибочности и своевременности действий, выполняемых параллельным способом с правилами окончания (1), (2).

Изложение основного материала

Варианты решения задачи

Показателем безошибочности выполнения структуры параллельных операций выступает вероятность её выполнения без ошибок P_B (т.е. вероятность её завершения без нарушений порядка и установленных правил и норм).

В схеме (2) требуется выполнить безошибочно все работы, поэтому

$$P_B = \prod_{i=1}^n P_i, \quad (3)$$

где P_i – вероятность безошибочного выполнения i -й операции.

Схему (1) будем трактовать такой, для безошибочного завершения задачи в которой достаточно выполнить без ошибки любую первую работу. В этом случае

$$P_B = \sum_{i=1}^n C_i P_i, \quad (4)$$

где C_i – вероятность того, что первой будет завершена операция номер i . Причём, это событие появ-

ляется в случае, если операция i выполняется за некоторое время t , а все остальные позже. Следовательно

$$C_i = \int_0^{\infty} f_i(t) \prod_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^n [1 - F_j(t)] dt, \quad (5)$$

где $f_i(t)$ – плотность вероятности времени выполнения i -той работы,

$$F_j(t) = \int_0^t f_j(t) dt.$$

Как видим, для оценки безошибочности выполнения состязательной схемы параллельных работ необходимо располагать не только вероятностями безошибочного, но и законами времени выполнения каждой работы.

Оценка затрат времени

Случай 1. Функции распределения максимума $F_M(t)$ и минимума $F_{\mu}(t)$ времени (2) и (1) соответственно, определяются по заданным $F_j(t)$ как:

$$\left. \begin{aligned} F_M(t) &= P(T_M < t) = \prod_{j=1}^n F_j(t); \\ F_{\mu}(t) &= P(T_{\mu} < t) = 1 - \prod_{j=1}^n [1 - F_j(t)]. \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

Действительно, так как $F(t) = P(T < t)$, то первая из этих формул не что иное как вероятность того, что все работы будут завершены не позднее времени t . Произведение во второй формуле – это вероятность завершения всех работ за время, большее t , а дополнение её до единицы – вероятность выполнения хотя бы одной работы за время, меньшее t , в том числе обязательно та операция, которая завершена первой.

Численные расчёты по (5), (6) целесообразны при небольшом количестве параллельно выполняемых операций. Тогда можно вычислять математические ожидания и дисперсии времени решения задач по формулам, соответственно:

$$\left. \begin{aligned} M_s &= \sum_{k=1}^K k\tau \cdot \Delta F_s(k); \\ D_s &= \sum_{k=1}^K (k\tau - M_s)^2 \cdot \Delta F_s(k), \end{aligned} \right\} \quad (7)$$

где символ s заменяется на μ для схемы состязательной или на m для схемы с ожиданием, τ – малый интервал времени,

$$\Delta F(k) = F(k\tau) - F(k\tau - \tau).$$

С увеличением n погрешности вычислений и вычислительные затраты быстро растут.

Если функции распределения времени выполнения каждой из n работ одинаковы, то (6) принимают вид

$$\left. \begin{aligned} F_M(t) &= F^n(t); \\ F_\mu(t) &= 1 - [1 - F(t)]^n \end{aligned} \right\} \quad (8)$$

и могут интерпретироваться как распределения крайних членов выборки значений случайной величины T с функцией распределения $F(t)$.

В теории крайних членов выборки исследовано предельное поведение этих распределений при $n \rightarrow \infty$. Применительно к спасательным операциям на море привлекают внимание следующие случаи.

Случай 2. Случайная величина T ограничена снизу значением a и имеет плотность $f(t)$ такую, что $f(a+h) = c_\mu$ при малом $h > 0$. В [9, с. 402] показано, что в этом случае имеет место предельная (при $n \rightarrow \infty$) форма распределения минимума – смещённое экспоненциальное распределение

$$F_\mu(t) \sim \begin{cases} 1 - e^{-n(t-a)c_\mu}, & \text{при } t > a; \\ 0, & \text{при } t < a, \end{cases} \quad (9)$$

где pc_μ – его математическое ожидание.

Следствие: если T ограничена сверху значением b и её плотность $f(b+h) = c_M$, то при $n \rightarrow \infty$ распределение максимума следующее:

$$F_M(t) \sim \begin{cases} 1 - e^{-n(t-b)c_M}, & \text{при } t < b; \\ 1, & \text{при } t > b, \end{cases} \quad (10)$$

Случай 3. Этот случай соотнесём типовой ситуации с такой неопределённостью, в которой время T выполнения работы представляется, например экспертом, равномерно распределённым в интервале от a до b с известной функцией распределения:

$$F(t) = \begin{cases} 0, & \text{при } t < a; \\ t - a / b - a, & \text{при } a < t < b; \\ 1, & \text{при } t > b \end{cases} \quad (11)$$

и плотностью вероятности

$$f(t) = F'(t) = \begin{cases} 1/(b-a), & \text{при } a < t < b; \\ 0, & \text{при } t < a \text{ или } t > b \end{cases} \quad (12)$$

с математическим ожиданием $m = a + b/2$.

Из вида плотности (рис. 3) очевидно следует, что случайное T_μ будет прижиматься к точке a , иногда отклоняясь вправо с убывающей частотой; случайное T_M будет появляться у точки b , смещаясь влево и тем реже, чем дальше от неё.

В отличие от рассмотренного выше одностроннего ограничения, в данном случае T ограничено как снизу, так и сверху. Поэтому применимость зависимостей (9) и (10) в качестве распределений для минимального и максимального времени выполнения n параллельных операций можно оценить по отлнчию от единицы $F_\mu(b)$ и от нуля $F_M(a)$. А так как $f(t) = 1/(b-a)$ по всему интервалу $(b-a)$ то $F_\mu(b) = 1 - \exp(-n)$, $F_M(a) = 1 - \exp(-n)$.

Следовательно, в качестве оценки точности приближения (9), (10) при подчинении T распределению (11) служит значение $\Delta = \exp(-n)$, которое зависит только от числа n параллельно организуемых работ. Так, при $n=5$ имеем $\Delta = 0,0067$. Это значительно выше той точности, с которой обеспечиваются исходные данные.

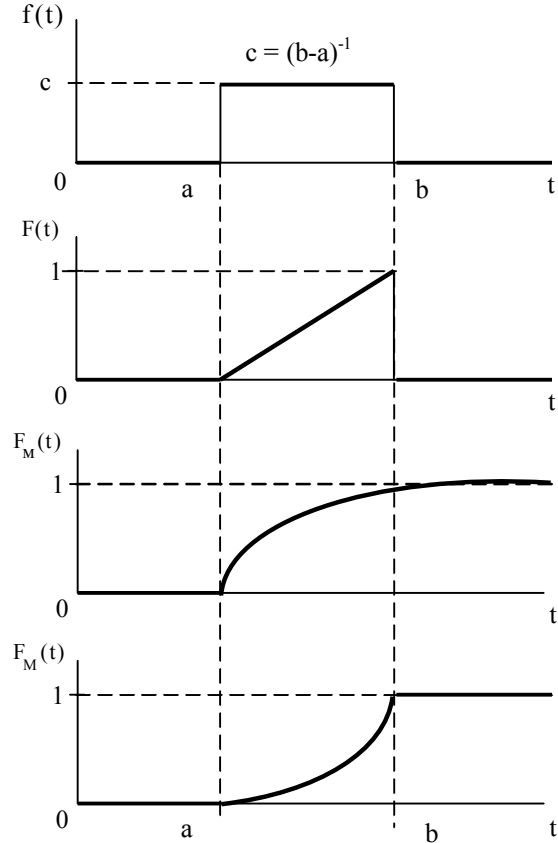


Рис. 3. Соотношение плотности $f(t)$ и функции распределения $F(t)$ времени выполнения каждой из n параллельных работ с функциями распределения времени выполнения всех работ при состязании $F_\mu(t)$ и ожидании $F_M(t)$

Случай 4. Время выполнения каждой из n работ параллельной схемы подчиняется гамма-распределению, эмпирически подтверждённое при моделировании сетевыми методами процессов планирования и управления, операционных процессов функционирования различных систем.

В этом случае в (8) вводится

$$F(t) = \gamma(\alpha, \beta; t) / \Gamma(\alpha), \quad (13)$$

где $\Gamma(*)$ – полная гамма-функция, $\gamma(*, *)$ – неполная гамма-функция; β – параметр формы; α – параметр масштаба.

Численные расчёты по (8) при $\alpha=5$ в этом случае (рис. 4) свидетельствуют о сходимости $F_\mu(t)$ и $F_M(t)$ при $n \rightarrow \infty$ к своим предельным формам на хвостах исходного распределения $F(t)$, но не так быстро, чтобы уверенно использовать (8) при небольших n .

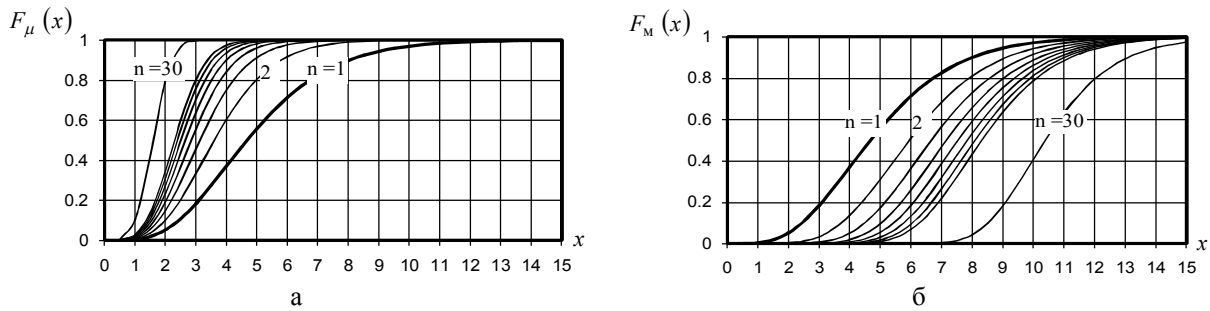


Рис. 4. Семейства функций $F_{\mu}(x)$ и $F_M(x)$ при $x = \beta t$

Из теории известно, что при достаточно быстром приближении $F(t)$ к единице при $t \rightarrow \infty$ справедливо асимптотическое распределение максимума – двойной показательный закон.

$$F_M(t) \sim e^{-e^b(t-a)}, \tag{14}$$

где a – параметр расположения (мода);
 b – параметр масштаба.

Формулой (14) можно воспользоваться, если известны параметры, которые в интересующем нас приложении найти экспериментально не представляется возможным. Их целесообразно либо для каждой конкретной ситуации оценивать статистической имитацией на компьютере или установить приближённую связь с n и параметрами b , в исходного распределения (13). Можно показать, что оценкой моды может служить $a_2 = x_2/\beta$, если x_2 – больший действительный корень уравнения

$$x - (\alpha - 1) \ln x + \ln \Gamma(\alpha) = \ln n, \tag{15}$$

где $x = \beta t > \alpha - 1$.

В качестве функции распределения величины T_M при $t \rightarrow \infty$ и не малых b можно принять асимптотическое распределение

$$F_{\mu}(t) \sim 1 - e^{-e^b(t-a)} \tag{16}$$

с ориентировочной оценкой моды, равной $a_1 = x_1/\beta$, если x_1 – меньший действительный корень уравнения

$$x - \alpha \ln x + \ln \Gamma(\alpha + 1) = \ln n, \tag{17}$$

где $x = \beta t < \alpha - 1$.

При этом соответствующие оценки параметра масштаба будут:

$$b_1 = \beta \left(1 - \frac{\alpha - 1}{x_1} \right) < 0; \quad b_2 = \beta \left(1 - \frac{\alpha - 1}{x_2} \right) > 0. \tag{18}$$

На рис. 5 приведены графики функций $z(b, x)$ с восходящими ветвями, построенными по левой части уравнения (15), нисходящими ветвями, построенными по левой части уравнения (17).

Точкам пересечения уровня $\ln n$ с кривой для заданной b соотносятся x_1 и x_2 (как показано на примере $b = 8$ и $n = 55$). При малых n решения грубые, а ниже $z_{\min} = (b-1)[1 - \ln(b-1)] + \ln \Gamma(b)$ решения не существуют. С ростом b гамма-распределение сближается с нормальным законом (при связи их параметров: среднее $m = \alpha/\beta$, дисперсия $d = b/\beta^2$).

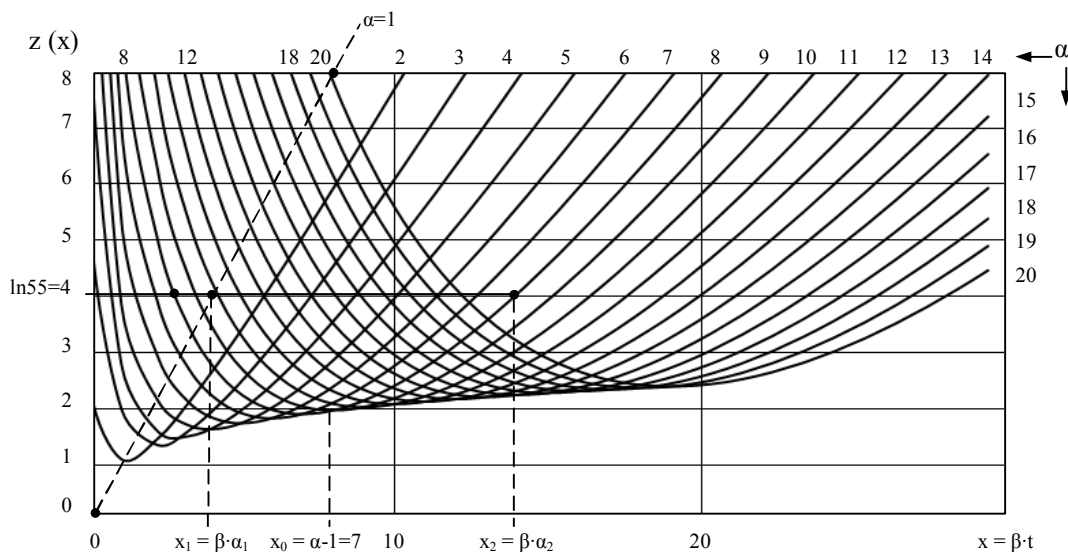


Рис. 5. Функции $z(x, \alpha)$

Поэтому полученные приближения пригодны и для ориентировочного оценивания математических ожиданий M и дисперсий D минимума T_M (при $k=1$) и максимума T_M (при $k=2$) времени выполнения параллельных работ:

$$M_k = \alpha_k + c/\beta_k; \quad D_k = \pi^2/6\beta_k^2,$$

где $c = 0,5772 \dots$ – постоянная Эйлера.

В качестве важного дополнительного показателя быстродействия в рассматриваемых случаях выступает размах времени решения задачи в виде разности математических ожиданий $M_2 - M_1$ или мод $a_2 - a_1$.

Применение аналитических зависимостей для приближённого оценивания затрат времени на действия спасателей параллельным способом связаны с допущением о возможности представления законов распределения времён выполнения каждой работы одним распределением, указанным по рассмотренным случаям. Если это допущение не приемлемо, то следует воспользоваться точными формулами (6), (7) с большим объёмом вычислений.

Выводы

1. В спасательных операциях на море вблизи берега закономерны структурные фрагменты с параллельной организацией работ, выполняемых спасателями при решении задач. Новым результатом является установление связи показателей качества выполнения таких фрагментов операции с данными по безошибочности, времени выполнения работ по параллельным ветвям, их числу и правилу окончания.

2. Повышение адекватности моделей процессов спасательных операций с параллельной организацией связано с необходимостью их корректировки и повышения достоверности параметров по мере преодоления неопределённости ситуаций от общих типовых, приемлемых при специальной подготовке спасательных служб и раннем планировании спасательных действий, до детальной в конкретном случае руководства спасательной операцией.

Список литературы

1. Аварийность мирового флота / *Морской флот.* – М., 2010. – № 01-4. – С. 78-79.
2. Аварийность мирового флота / *Морской флот.* – М., 2010. – № 4. – С. 66-73.
3. Аварийность мирового флота / *Морской флот.* – М., 2010. – № 5-6. – С. 67-78.
4. *Admiralty List of Radio Signals. Global Maritime Distress and Safety System. Vol. 5. IMO: London, 2012. – 465 p.*
5. Ашерев А.Т. Эргономика информационных технологий: уч. пос. / А.Т. Ашерев, С.А. Капленко, В.В. Чубук. – Х.: ХГЭУ, 2000. – 224 с.
6. Ашерев А.Т. Эргономика информационных технологий в примерах и задачах: учеб. пос. / А.Т. Ашерев, Г.И. Сажко, Е.А. Лавров и др. – Горловка: Лихтар, 2007. – 214 с.
7. Вильский Г.В. Навигационная безопасность при лоцманской проводке судов / Г.В. Вильский, А.С. Мальцев, В.В. Бездольный; под ред. Г.В. Вильского. – Одесса: Феникс, 2007. – 330 с.
8. Гвоздик М.И. Оптимизация организационно-технических систем ВМФ. Методы, алгоритмы, программы / М.И. Гвоздик, В.Е. Евграфов, Е.Б. Цой. – Петродворец: ВВМУРЭ им. А.С. Попова, 1997. – 223 с.
9. Информационно-управляющие человеко-машинные системы: исследование, проектирование, испытания: справочник / А.Н. Адаменко, А.Т. Ашерев, И.Л. Бердников и др.; под общ. ред. А.И. Губинского и В.Г. Евграфова. – М.: Машиностроение, 1993. – 528 с.
10. Лобода П.Х. Аналіз аварійності на морі, її причини та наслідки / П.Х. Лобода // *Зб. наук. праць АВМС ім. П.С. Нахімова.* – Севастополь: АВМС ім. П.С. Нахімова, 2013. – Вип. 1 (13). – С. 215-222.
11. Смирнов Н.В. Курс теории вероятностей и математической статистики (для технических приложений) / Н.В. Смирнов, И.В. Дунин-Барковский. – М.: Наука, ГРФМЛ, 1969. – 511 с.
12. Чабаненко П.П. Исследование безопасности и эффективности функционирования систем человек-техника эргосетями / П.П. Чабаненко. – Севастополь: АВМС им. П.С. Нахимова, 2012. – 162 с.
13. Шишкин А.В. Глобальная Морская система связи при бедствии и для обеспечения безопасности мореплавания (ГМССБ) / А.В. Шишкин, В.И. Курновский, В.М. Кошевой. – М.: ТрансЛит, 2007. – 531 с.

Поступила в редколлегию 8.09.2014

Рецензент: д-р техн. наук, проф. Г.В. Певцов, Харьковский университет Воздушных Сил им. И. Кожедуба, Харьков.

ОЦІНКА БЕЗПОМИЛКОВОСТІ Й ШВИДКОДІЇ СТРУКТУР РЯТУВАЛЬНИХ ОПЕРАЦІЙ НА МОРЕ С ПАРАЛЕЛЬНОЮ ОРГАНІЗАЦІЄЮ РОБІТ

С.А. Гайдук, П.П. Чабаненко

На основі аналізу аварійності на морі виявлене вузьке місце в плануванні й керуванні рятувальними операціями – обґрунтування дій рятувальників з паралельною організацією. Для оцінки безпомилковості й швидкодії таких структурних підпроцесів запропоновані аналітичні залежності по характерним випадкам.

Ключові слова: аварійність, рятувальна операція, паралельні роботи, безпомилковість, швидкодія, граничні розподіли.

ESTIMATION OF CORRECT AND SPEED RESCUE OPERATIONS AT THE SEA PARALLELED WITH THE ORGANIZATION OF ACTION

S.A. Gaiduk, P.P. Chabanenko

Analysis of accident rate at the sea revealed a weak point in planning and direction of rescue operations – grounding of rescuers actions with a paralleled organization. There have been propounded analytical dependences for estimation of correct and speed actions for such structural subprocesses on account of typical cases.

Keywords: accident rate, rescue operation, paralleled organization, correct, speed rescue, limiting distribution.