

## К ВОПРОСУ ОБ ОЦЕНКЕ РИСКОВ ПОСАДКИ СУДНА НА МЕЛЬ

Е.П. Бураковский, П.Е. Бураковский, В.А. Дмитриевский

ФГБОУ ВПО «Калининградский государственный технический университет»,  
Россия, 236022, г. Калининград, Советский проспект, 1  
E-mail: e\_burakovsky@mail.ru

Разработаны математические модели посадки судна на камни на шельфе при изменении характеристик внешней среды, в которой эксплуатируется судно.

*посадка на мель, математическая модель, вероятность*

Посадка судов на мель относится к самым распространенным видам аварий на судах мирового флота [1]. Интенсивное освоение арктического шельфа, обусловленное добычей углеводородного сырья, требует оценки безопасности работы крупнотоннажных газовозов в связи с риском посадки их на скалы, камни и т.д. Ведь, как известно, попадание газа в атмосферу – крупномасштабная техногенная авария с тяжелыми последствиями. Поэтому необходимо исключить возможность аварии при транспортировке такого опасного груза, как сжиженный газ.

Используемое в морской практике понятие «посадка на мель» включает в себя целый спектр расчетных сценариев: здесь и посадка на песчано-илистый грунт в условиях мелководья, и удар о подводный камень, и посадка на рифы, и «обсыхание» при отливе, и другие подобные случаи [2]. Одним из наиболее опасных сценариев является посадка судна днищем на камень в условиях мелководья.

Рассмотрим некоторую судоходную акваторию, в которой случайным образом разбросаны возвышения со случайными высотами, представляющие собой отмели, скалы, камни и острова. Эти возвышения могут радикально влиять на безопасность мореплавания в рассматриваемой акватории.

Сделаем ряд упрощающих предположений.

1. Возвышения являются точечными объектами, т.е. имеют нулевую площадь.

2. Возвышения образуют в акватории пуассоновское поле. Количество возвышений на любой части акватории площадью  $S$  является случайной величиной  $\nu$ , распределённой по закону Пуассона, т.е.

$$P\{\nu = k\} = \frac{(\lambda S)^k}{k!} \exp\{-\lambda S\}, k \geq 0.$$

Здесь  $\lambda$  – константа, являющаяся средним числом возвышений на единицу площади акватории, например – на одну квадратную милю. Количества  $\nu_1, \nu_2, \nu_3, \dots, \nu_N$  возвышений на любых  $N$  не пересекающихся частях акватории есть независимые в совокупности случайные величины при любом  $N$ .

3. Высота  $\xi$  любого возвышения является случайной величиной с функцией распределения  $F_\xi(x)$  и плотностью распределения  $f_\xi(x)$ , где  $-\infty < x < \infty$ , и отсчитывается от поверхности воды. Таким образом, отрицательная высота соответствует подводным камням, скалам и отмелям, а положительная – надводным скалам и островам.

4. Высоты  $\xi_1, \xi_2, \dots, \xi_N$  любых  $N$  возвышений являются независимыми в совокупности случайными величинами.

Рассмотрим простейшую модель (первая модель). Обозначим через  $\eta$  максимальную высоту возвышений, находящихся на части акватории площадью  $S$ . Найдём её функцию распределения. По формуле полной вероятности

$$\begin{aligned}
 F_\eta(x) &= P\{\eta < x\} = \sum_{k=0}^{\infty} P\{v = k\} P\{\max\{\xi_i\} < x \mid 1 \leq i \leq k\} = \sum_{k=0}^{\infty} P\{v = k\} (P\{\xi < x\})^k = \\
 &= \sum_{k=0}^{\infty} P\{v = k\} F_\xi^k(x) = \exp\left\{-\lambda S \sum_{k=0}^{\infty} \frac{(\lambda S F_\xi(x))^k}{k!}\right\} = \exp\{-\lambda S(1 - F_\xi(x))\} = \exp\{-\lambda S \overline{F}_\xi(x)\}
 \end{aligned}
 \tag{1}$$

Здесь  $\overline{F}_\xi(x) = 1 - F_\xi(x)$  – функция, дополнительная к  $F_\xi(x)$ .

Предположим, что длина маршрута судна по акватории составляет  $L$  миль, ширина судна –  $w$ , осадка –  $m$  (положительное число) (рис.1). Для предотвращения крушения судна необходимо, чтобы вдоль его маршрута площадью  $S = w \times L$  максимальная высота возвышений не превысила его осадки –  $m$  (отрицательное число). Таким образом, вероятность безаварийного плавания судна в акватории будет

$$F_\eta(-m) = \exp\{-\lambda w L \overline{F}_\xi(-m)\}.
 \tag{2}$$

Результаты расчета вероятности отсутствия посадки судна на мель по первой модели для различных  $\lambda$  представлены на рис. 2.

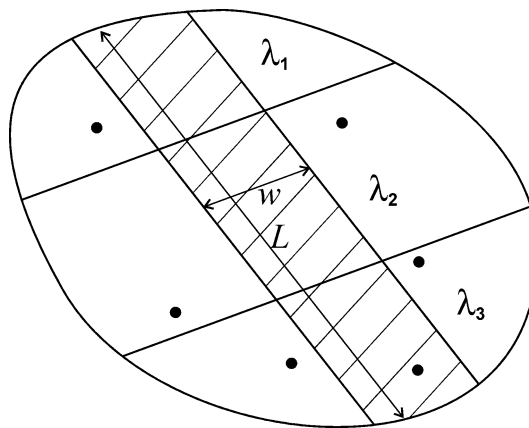


Рис. 1. Схема акватории со случайным образом расположенными отмелями  
 Fig. 1. Area of water chart with random shoals distribution

Видно, что при осадке судна до 10 м практически обеспечена безаварийность плавания, в то время как при осадке  $m=11$  м вероятность аварии начинает расти. Вероятность безаварийного плавания начинает падать больше там, где интенсивность  $\lambda$  имеет большее значение.

Перейдем ко второй, усложненной, модели. Предположим, что подводные препятствия имеют переменную плотность распределения по акватории. В таком случае можно представить, что акватория площадью  $S$  распадается на  $N$  участков (подакваторий) с площадями  $S_i$ ,  $S = \sum_{i=1}^N S_i$  и разными характеристиками  $\lambda_i$  и  $F_{\xi_i}(x)$ , где  $1 \leq i \leq N$ . Тогда по формуле полной вероятности, обобщая простейший случай, получим:

$$F_{\eta}(x) = \prod_{i=1}^N F_{\eta_i}(x) = \prod_{i=1}^N \exp\{-\lambda_i S_i \overline{F_{\xi_i}}(x)\} = \exp\left\{-\sum_{i=1}^N \lambda_i S_i \overline{F_{\xi_i}}(x)\right\}. \quad (3)$$

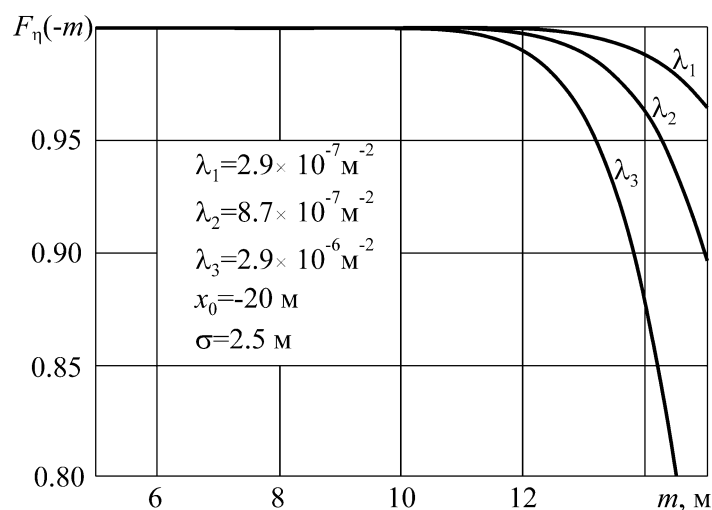


Рис. 2. Вероятность отсутствия посадки на мель согласно первой модели  
Fig. 2. Probability of lack of running aground according the first model

Оценим влияние изменения характеристик  $\lambda_i$  и  $F_{\xi_i}(x)$  на вероятность безаварийного плавания. Предположим, что судно проходит по акватории  $S$ , имеющей пять зон с различными характеристиками  $\lambda_i$ , при этом:  $\lambda_1 = 2.9 \cdot 10^{-7} \text{ м}^{-2}$ ,  $\lambda_2 = 3 \cdot \lambda_1$ ,  $\lambda_3 = 10 \cdot \lambda_1$ ,  $\lambda_4 = 15 \cdot \lambda_1$ ,  $\lambda_5 = 20 \cdot \lambda_1$ . Пусть плотность распределения высот вершин  $f_{\xi_i}(x)$  для отдельных подакваторий задается в соответствии с рис. 3. Видно, что на первом участке акватории математическое ожидание высоты вершины имеет наименьшее значение среди всех подакваторий, однако среднее квадратичное отклонение максимально по сравнению с другими участками. При переходе ко второй части акватории математическое ожидание несколько возрастает, однако среднее квадратичное отклонение уменьшается, а наибольшее значение математического ожидания и наименьшее значение среднего квадратичного отклонения высот вершин соответствуют пятой акватории, для

которой значение  $\lambda$  максимально. Результаты расчета представлены на рис. 4. Сплошной кривой обозначено последовательное прохождение судна через все пять акваторий, пунктирные линии отображают вероятность безаварийного плавания для случая, когда весь маршрут судна проходил по акватории с параметрами препятствий, соответствующими каждой из акваторий в отдельности. Видно, что параметр  $\lambda$  и параметры плотности распределения высот вершин  $f_{\xi}(x)$  (математическое ожидание и среднее квадратичное отклонение) оказывают существенное влияние на вероятность безаварийного плавания. Так, для пятой акватории с наибольшим средним числом возвышений на единицу площади вероятность отсутствия аварии оказывается наибольшей вследствие малого среднего квадратичного отклонения высот вершин. При этом кривые вероятности, соответствующие отдельным акваториям, имеют точки пересечения.

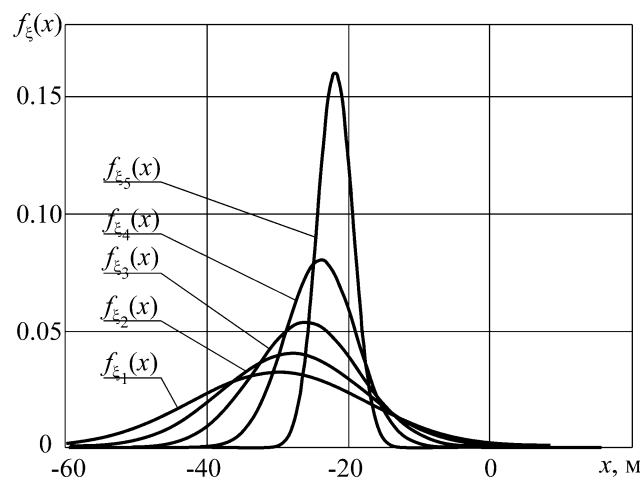


Рис. 3. Плотность распределения высот вершин для различных частей акватории  
 Fig. 3. Density of peaks heights distribution in various area of water parts

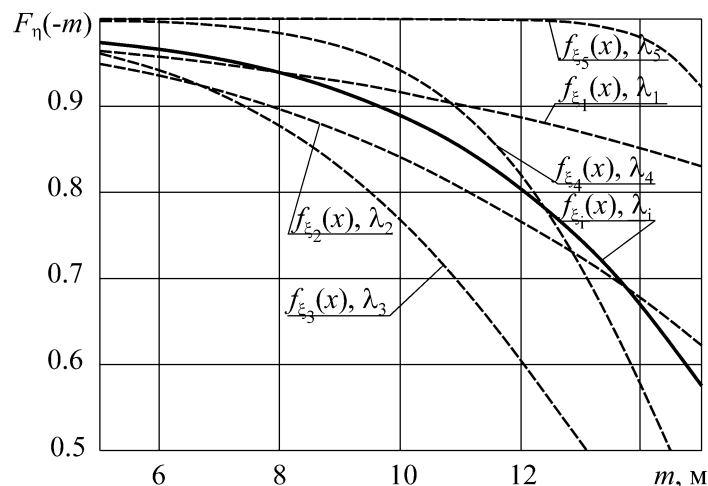


Рис. 4. Вероятность отсутствия посадки на мель согласно второй модели  
 Fig. 4. Probability of lack of running aground according the second model

В районах Крайнего Севера глубина расположения препятствий сильно зависит от приливов и отливов, поэтому проанализируем другое усложнение простейшей модели, учитывая их (третья модель). Теперь высоты будут отсчитываться от некоторого среднего уровня поверхности воды, а текущий уровень воды становится переменной величиной.

Рассмотрим ситуацию из модели 1 в пределах одной акватории, для которой характеристики  $\lambda$  и  $F_{\xi}(x)$  постоянны (относительно среднего уровня поверхности воды). Предположим, что текущий уровень поверхности воды описывается функцией  $u(l)$ , где  $l$  – расстояние от начала маршрута. Функция  $u(l)$  положительна при приливах и отрицательна при отливах.

Разобьём весь маршрут длиной  $L$  миль на  $M$  коротких отрезков длиной  $\Delta = L/M$ ,  $l_i$  – середины отрезков. Теперь мы фактически имеем дело с моделью 2, где разнородность характеристик обусловлена только изменением уровня воды относительно её среднего уровня, при этом  $S_i = w\Delta$ . Следовательно,

$$F_{\eta}(x) = \exp\left\{-\sum_{i=1}^M \lambda_i S_i \overline{F_{\xi}}(x)\right\} = \exp\left\{-\lambda w \sum_{i=1}^M \overline{F_{\xi}}(x + u(l_i))\Delta\right\}. \quad (4)$$

Устремляя  $M$  к бесконечности (и, соответственно,  $\Delta$  – к нулю), в пределе получим

$$F_{\eta}(x) = \exp\left\{-\lambda w \int_0^L \overline{F_{\xi}}(x + u(l))dl\right\}. \quad (5)$$

Следовательно, вероятность безаварийного плавания судна по этому маршруту будет

$$F_{\eta}(-m) = \exp\left\{-\lambda w \int_0^L \overline{F_{\xi}}(u(l) - m)dl\right\}. \quad (6)$$

Общая формула определения  $F_{\eta}(x)$  для маршрута, проходящего по акваториям с разными характеристиками (совмещение моделей 2 и 3), легко получается из формулы (5), но выглядит довольно громоздко:

$$F_{\eta}(x) = \prod_{i=1}^N F_{\eta_i}(x) = \exp\left\{-w \sum_{i=1}^N \lambda_i \int_0^{L_i} \overline{F_{\xi_i}}(x + u_i(l))dl\right\}. \quad (7)$$

Результаты расчета при различных скоростях изменения уровня воды представлены на рис. 5. Видно, что изменение уровня воды оказывает существенное влияние на вероятность отсутствия аварии, а это свидетельствует о необходимости учета явлений прилива и отлива и ограниченности области применения существующих математических моделей [3], игнорирующих данные обстоятельства.

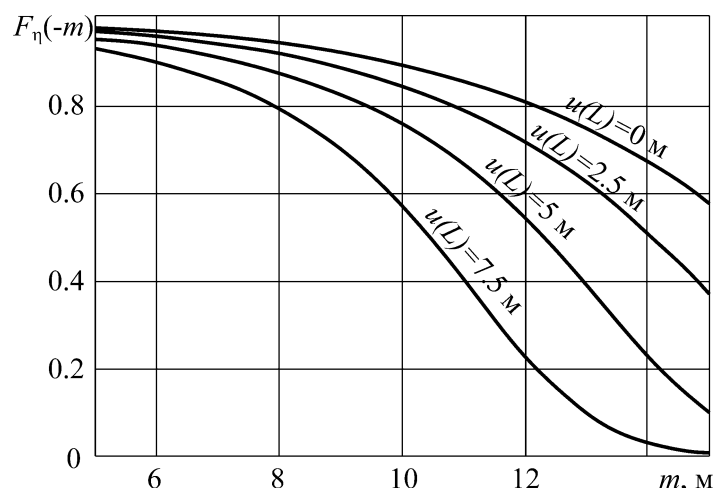


Рис. 5. Вероятность отсутствия посадки на мель согласно третьей модели  
 Fig. 5. Probability of lack of running aground according the third model

Представленные математические модели в целом позволяют качественно оценить вероятность безаварийного плавания (отсутствия контакта со скалами и камнями) для различных условий эксплуатации судна.

#### СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ЛИТЕРАТУРНЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Лушников, Е.М. Навигационная безопасность мореплавания / Е.М. Лушников. – Калининград: Изд-во БГАРФ, 2007. – 261 с.
2. Нестеров, А.Б. Проблема регламентации сценариев аварийной ситуации и сопоставительного анализа аварийной прочности перспективных газовозов / А.Б. Нестеров // Сборник трудов ЦНИИ им. акад. А.Н. Крылова. – СПб.: ЦНИИ им. акад. А.Н. Крылова, 2011. – Вып. 65(349). – С. 27-36.
3. Mazaheri, A. Probabilistic modeling of ship grounding: a review of the literature / A. Mazaheri. – Helsinki University of Technology, Finland, 2009. – 63 p.

#### TO THE PROBLEM OF ASSESSMENT OF RISK OF GETTING THE SHIP AGROUND

E.P. Burakovskiy, P.E. Burakovskiy, V.A. Dmitrovskiy

Mathematical models of getting the ship on shelf stones at changing environment characteristics where the ship operates have been developed.

*getting aground, mathematical model, probability*