

УДК: 623.438.7

**МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ПРОЦЕССА ВЫХОДА ПЛАВАЮЩЕЙ
МАШИНЫ ИЗ ВОДЫ НА БЕРЕГ**

**MATHEMATICAL MODEL OF THE PROCESS OF LEAVING THE FLOATING
VEHICLE FROM THE WATER TO THE SHORE**

А.В. Шаховцов¹, д-р техн. наук В.И. Кузнецов², К.О. Серяков³

A.V. Shakhovtsov, D.Sc. V.I. Kuznetsov, K.O. Seryakov

¹*Омский автобронетанковый инженерный институт*

²*Омский государственный технический университет*

³*Омский государственный университет путей сообщения*

В статье предложена математическая модель процесса выхода плавающей машины из воды на берег. При этом в качестве оценочного показателя принята вероятность не застревания плавающей машины. Принятый показатель хорошо согласуется с комплексными оценочными показателями подвижности и боевой эффективности плавающих машин. Предложенная математическая модель может быть использована для разработки методики оценки проходимости плавающих машин при преодолении водных преград. Применение указанной методики позволит проводить количественную оценку проходимости существующих машин, а также образцов плавающих машин еще на этапе их проектирования и тем самым, уменьшить финансовые затраты на проведение натурных испытаний.

Ключевые слова: плавающая машина, водная преграда, мелководье, выход на берег, проходимость, математическая модель, вероятность.

The article proposes a mathematical model of the process of a floating vehicle leaving the water to the shore. At the same time, the probability of a floating vehicle not getting stuck was taken as an estimated indicator. The adopted indicator is in good agreement with the complex estimated indicators of the mobility and combat effectiveness of amphibious vehicles. The proposed mathematical model can be used to develop a technique for assessing the passability of floating vehicles when overcoming water obstacles. The application of this technique will allow for a quantitative assessment of the passability of existing machines, as well as samples floating vehicle at the stage of their design, and thereby reduce the financial costs of carrying out full-scale tests.

Keywords: floating vehicle, water barrier, shallow water, access to the shore, passability, mathematical model, probability.

В настоящее время плавающие машины (ПМ) благодаря своим свойствам получили широкое применение в военной и гражданской сферах деятельности. Применение ПМ технически и экономически оправдано, когда требуется осуществить транспортировку грузов, перевозку

людей в условиях полного бездорожья, там, где существует необходимость преодоления водных преград.

Поэтому наблюдается устойчивая тенденция к расширению области задач, решаемых с помощью ПМ. В гражданской сфере такие ма-

шины применяются в условиях наводнения, когда использование иных плавательных средств не обеспечивает необходимый уровень безопасности. В военных целях расширение использования ПМ обусловлено [1] необходимостью увеличения оперативной и тактической подвижности войск.

Преодоление ПМ водного участка включает три основных этапа: вход в воду, движение по воде и выход на берег. Отличительной особенностью первого и третьего этапов является одновременное взаимодействие машины с водой и грунтом, в частности, одновременная работа сухопутного и водоходного движителей или одновременное взаимодействие сухопутного движителя с грунтом и водой, если специальный водоходный движитель отсутствует. Такой режим движения возможен и на самом водном участке при недостаточной для полного всплытия глубине, а также в поймах рек и на прочих обводненных участках местности [2].

Опыт эксплуатации ПМ различного типа и назначения показывает [3, 8, 9], что в большинстве случаев водный участок становится непреодолимым препятствием не из-за быстрого течения, большой ширины или волнения, а из-за невозможности машин войти в воду и, особенно, выйти на неподготовленный берег. Для современных ПМ три четверти естественных берегов рек недоступны, а процессы входа в воду и выхода из воды на берег в условиях морских берегов и прибрежной акватории с течениями и волнениями в настоящее время исследованы недостаточно.

Обычно машины застревают из-за неблагоприятных грунтовых условий, крутых склонов берега или вертикальных уступов, наличия растительности. Вход в воду и выход на берег занимают незначительную долю общего времени движения (если машина не застревает), однако именно эти этапы преодоления водного участка являются критическими и обуславливают эффективность, и даже возможность использования машины [2].

Следовательно, проблема преодоления ПМ мелководных участков водных преград связана, прежде всего, с проблемой входа в воду и выхода из воды.

Проходимость на мелководье — это свойство, характеризующее способность ПМ само-

стоятельно входить в воду с берега, выходить из воды на берег и преодолевать мелководные участки при различном состоянии грунта и крутизне берегового склона.

Оценка данного свойства ПМ является значимой на каждом этапе разработки образца и является необходимым этапом исследований по обоснованию требований к образцам и комплексной оценке их подвижности при преодолении водных преград.

При оценке данного свойства, как правило, ограничиваются только оценкой способности машины выходить из воды на берег. Это связано с тем, что движение ПМ по мелководному участку достаточной протяженности можно отнести к выходу из воды на берег, либо входу в воду с берега малого угла наклона. А вход в воду, как правило, легче выхода, кроме того, все результаты, полученные для выхода, после простых преобразований можно отнести и к входу в воду.

При оценке проходимости ПМ наиболее широкое применение получил метод натуральных испытаний образцов [4], который, как правило, проводится по двум направлениям:

– исследования возможности входа в воду (выхода из воды) в испытательном бассейне с бетонным основанием и оборудованными входами в воду различной крутизны (как правило — 10° , 15° , 20° , 25° , 30°);

– исследования возможности входа в воду (выхода из воды) и движения по мелководным участкам в естественных водоемах.

Ни одно из указанных направлений не предоставляет возможности провести полную оценку проходимости ПМ на мелководье. Так, в первом случае можно получить результаты выхода машины из воды только на бетонном грунте. Во втором случае — отсутствует возможность изменять угол наклона берега.

Кроме того, при методе натуральных испытаний машина оценивается по принципу «прошла — не прошла», то есть дается только качественная оценка проходимости, количественных характеристик нет, а это ведет к невозможности сравнения различных образцов машин.

Сказанное дает возможность сформулировать основные недостатки метода натуральных испытаний:

– высокие финансовые затраты на обеспечение работ;

– отсутствие возможности проведения оценки проходимости ПМ по всей совокупности реальных грунтов и углов наклона берега;

– невозможность проведения количественной оценки свойства;

– невозможность применения метода на ранних стадиях разработки образца ПМ.

До настоящего времени различными организациями, связанными с разработкой ПМ, предпринимались попытки использования расчетно-аналитических методов для оценки проходимости на мелководье, позволяющих устранить недостатки метода натурных испытаний. Известные математические модели [5, 6, 9], описывающие процесс выхода плавающей машины из воды на берег (вход в воду) либо слишком громоздки и требуют очень большого числа исходных данных, получить которые без наличия реального образца ПМ практически невозможно, либо, наоборот, слишком упрощены [7].

Одна из наиболее распространенных расчетных методик оценки проходимости на мелководье предложена в работе [7], в которой для выбора оценочного показателя рассматривается скорость машины при выходе из воды на берег.

В работе [7] при моделировании приняты следующие основные допущения:

– движение ПМ происходит в вертикальной продольной плоскости симметрии образца, линия уреза воды перпендикулярна плоскости движения;

– профиль берега и свойства грунта одинаковы под движителями обоих бортов, профиль предполагается плоским, а грунт — недеформируемым;

– волнение и течение водной поверхности в районе выхода на берег отсутствуют;

– расчет осуществляется на момент выхода из воды основной части водоизмещающего корпуса и прекращения работы специального водоходного движителя, что соответствует наиболее сложному этапу процесса движения.

Недостатками данной методики являются:

– трудоемкость подготовки исходных данных, неудобство в работе, так как для каждого значения угла наклона берега необходимо графически определять площадь погруженной в воду части корпуса и ее объем (при этом точность графических измерений невелика);

– принятие не вполне обоснованных допущений — недеформируемый грунт, отсутствие буксования, отсутствие учета течения и волнения.

Указанные недостатки дают основание предполагать, что предлагаемая математическая модель недостаточно отражает реальный процесс выхода ПМ из воды на берег, а результаты оценки проходимости ПМ на мелководье с использованием данной методики обладают недостаточной достоверностью.

Эксплуатация ПМ происходит на местности, отличающейся по геометрии поверхности и физико-механическим свойствам грунтов. Для моделирования работы машины в изменяющихся и неопределенных условиях, как правило, применяют вероятностный подход.

Следовательно, целью данной работы является разработка математической модели выхода ПМ из воды на берег с использованием математического аппарата теории вероятностей. В качестве оценочного показателя принимаем вероятность преодоления машиной мелководного участка.

В работе [10] рассмотрен процесс выхода ПМ из воды на берег при совместной работе сухопутного и водоходного движителей. Учтено, что вес ПМ в процессе движения может отличаться от номинального и его действительная величина при подходе к берегу будет равна ζG , где ζ — коэффициент изменения массы из-за наличия в корпусе воды.

Профиль берега — прямолинейный с уклоном α . Свойства грунта берега характеризуются коэффициентом сцепления с грунтом φ и коэффициентом сопротивления движению f . Коэффициенты ζ , φ , f и уклон берега α являются случайными величинами. Величина ζ не зависит от φ , f , α , последние же являются взаимозависимыми. Закон распределения величины ζ и системы (φ, f, α) принят усеченным нормальным. Требуется определить вероятность выхода машины из воды на берег.

Условие выхода ПМ из воды на берег, с учетом силы тяги дополнительного (вспомогательного) тягового устройства (при его наличии) примет вид:

$$P_c + P_b + T_d \geq R_f + R_i + R, \quad (1)$$

где P_c — сила тяги сухопутного движителя;

P_b — сила тяги водоходного движителя;
 T_d — сила тяги дополнительного (вспомогательного) тягового устройства;
 R_f — сила сопротивления грунта движению;
 R_i — сила сопротивления подъему;
 R — сила сопротивления воды.

Тогда, разность между движущими силами и силами сопротивления обозначим через функцию Φ :

$$\Phi = P_c + P_b + T_d - R_f - R_i - R. \quad (2)$$

Функция Φ зависит от положения ПМ относительно берега (от пройденного пути). Принимается, что $P_b = \text{const}$ в процессе выхода и $P_b = 0$ в конце выхода (когда сила плавучести корпуса $Q = 0$), а силы Q и R изменяются линейно на пути выхода от своих начальных значений (при положении на плаву) до нуля в конце выхода.

Так как динамические процессы характерны, в основном, для начальной стадии выхода (после контакта сухопутного движителя с грунтом до момента, когда сила плавучести уменьшается примерно на 20 % от начальной на плаву) [4], то за начало выхода примем такое положение машины, когда ее сцепной вес равен $G_{сч} = 0,2 \cdot \zeta \cdot G \cdot \cos \alpha$, а за конец выхода — положение, когда корпус машины полностью выйдет из воды и сила плавучести $Q = 0$.

Допустим, что функция Φ может принимать наименьшие значения только в начале и в конце выхода. Движение машины от начала до конца выхода из воды на берег считаем установившимся. Выход на берег возможен, если функция Φ является положительной в ходе всего процесса выхода.

Величина Φ является функцией случайных величин $\zeta, f, \varphi, \alpha$, следовательно, сама есть случайная величина.

Вероятность незастревания ПМ в начале выхода

$$P_0 = P(\Phi_0 > 0), \quad (3)$$

в конце выхода

$$P_1 = P(\Phi_1 > 0), \quad (4)$$

где Φ_0 и Φ_1 — значения случайной величины Φ в начале и в конце выхода.

Вероятность успешного выхода машины из воды на берег определим по минимуму вероятностей незастревания в начале и в конце выхода

$$P_{\text{вых}} = \min(P_0, P_1). \quad (5)$$

Для определения P_0 и P_1 находим распределение величины Φ для каждого случая. Так как Φ является нелинейной функцией аргументов $\zeta, f, \varphi, \alpha$, то пользуются следующим приближением для функции Φ в окрестности точки M с координатами $(M\zeta, M\varphi, Mf, M\alpha)$ (символ Mx обозначает математическое ожидание случайной величины x):

$$\Phi \approx \frac{\Phi}{M} + A_1(\zeta - M\zeta) + A_2(\varphi - M\varphi) + A_3(f - Mf) + A_4(\alpha - M\alpha), \quad (6)$$

где A_i ($i = 1, 2, 3, 4$) — частные производные функции Φ по переменным $\zeta, f, \varphi, \alpha$, соответственно.

Полученное приближение для Φ имеет нормальное распределение, а математическое ожидание

$$M\Phi = \Phi(M\zeta, M\varphi, Mf, M\alpha). \quad (7)$$

Так как случайные величины φ, f, α зависят, то для определения стандартного отклонения σ_φ кроме значений стандартных отклонений величин φ, f, α , используем корреляционную матрицу:

$$\begin{pmatrix} \mathbf{1} & \mathbf{r}_{\varphi f} & \mathbf{r}_{\varphi \alpha} \\ \mathbf{r}_{\varphi f} & \mathbf{1} & \mathbf{r}_{f \alpha} \\ \mathbf{r}_{\varphi \alpha} & \mathbf{r}_{f \alpha} & \mathbf{1} \end{pmatrix}. \quad (8)$$

Тогда:

$$\begin{aligned} \sigma_\varphi^2 = & (A_1 \cdot \sigma_1)^2 + (A_2 \cdot \sigma_2)^2 + (A_3 \cdot \sigma_3)^2 + \\ & + (A_4 \cdot \sigma_4)^2 + 2 \cdot A_2 \cdot A_3 \cdot \sigma_2 \cdot \sigma_3 \cdot r_{\varphi f} + \\ & + 2 \cdot A_2 \cdot A_4 \cdot \sigma_2 \cdot \sigma_4 \cdot r_{\varphi \alpha} + 2 \cdot A_3 \cdot A_4 \cdot \sigma_3 \cdot \sigma_4 \cdot r_{f \alpha}, \end{aligned} \quad (9)$$

где $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3, \sigma_4$ — среднеквадратические отклонения величин $\zeta, f, \varphi, \alpha$.

Случайная величина Φ , в свою очередь, имеет усеченное распределение, поскольку случайные величины $\zeta, f, \varphi, \alpha$ изменяются в пределах:

$$1 \leq \zeta \leq \zeta_{\max}; 1 \leq \varphi \leq \varphi_{\max};$$

$$1 \leq f \leq f_{\max}; 1 \leq \alpha \leq \alpha_{\max}, \quad (10)$$

где ζ_{\max} — соответствует запасу плавучести;
 φ_{\max} и f_{\max} — соответствуют максимальным коэффициентам сцепления и сопротивления движению машины;

α_{\max} — соответствует наибольшему реальному уклону берега.

Так как величина Φ зависит от своих аргументов, то Φ_{\min} и Φ_{\max} определяются перебором вершин параллелепипеда (10) (всего вершин $24 = 16$). Определив их, находят плотность распределения случайной величины Φ

$$f(\Phi) = \begin{cases} \frac{1}{\sigma_{\varphi} \cdot \sqrt{2 \cdot \pi}} \cdot \exp \left[-\frac{(\Phi - M\Phi)^2}{2 \cdot \sigma_{\varphi}^2} \right] \\ \tilde{\Phi} \left(\frac{\Phi_{\max} - M\Phi}{\sigma_{\varphi}} \right) - \tilde{\Phi} \left(\frac{\Phi_{\min} - M\Phi}{\sigma_{\varphi}} \right), \Phi \in [\Phi_{\min}, \Phi_{\max}], \\ 0, \Phi \notin [\Phi_{\min}, \Phi_{\max}] \end{cases}, \quad (11)$$

где $\tilde{\Phi}$ — функция не усеченного распределения с параметрами $M\Phi$, σ_{φ} (функция Лапласа) [4].

Затем определяем вероятности не застревания машины в начале и в конце выхода P_0 , P_1 .

$$P_0 = P(\Phi_0 > 0) = \begin{cases} \tilde{\Phi} \left(\frac{\Phi_{\max} - M\Phi}{\sigma_{\varphi}} \right) - \tilde{\Phi} \left(-\frac{M\Phi}{\sigma_{\varphi}} \right) \\ \tilde{\Phi} \left(\frac{\Phi_{\max} - M\Phi}{\sigma_{\varphi}} \right) - \tilde{\Phi} \left(\frac{\Phi_{\min} - M\Phi}{\sigma_{\varphi}} \right), \Phi_{\min} \leq 0 \leq \Phi_{\max}. \\ 0, \Phi_{\max} < 0 \\ 1, \Phi_{\min} > 0 \end{cases}, \quad (12)$$

По формуле (12) определяем также и вероятность P_1 . При этом величина $M\Phi$ и частные производные A_i вычисляются для конца выхода. После расчета значений P_0 и P_1 вероятность успешного выхода машины из воды на берег определяется по формуле (5).

Математическая модель с использованием формул (8)...(12) получается достаточно громоздкой. Для того, чтобы несколько упростить математическую модель, практически не влияя на точность вычислений, примем дополнительное допущение о независимости друг от друга случайных величин ζ , f , φ , α , а закон их распределения примем нормальным неусеченным. Такие допущения позволяют также расширить диапазон изменения рабочих исходных данных, что необходимо для ведения последующей исследовательской деятельности с использованием модели.

Поскольку было принято дополнительное допущение о не усеченном нормальном законе распределения случайных величин ζ , f , φ , α , то

и случайная величина Φ , в свою очередь, имеет не усеченное нормальное распределение, то есть

$$\Phi_{\min} = -\infty, \Phi_{\max} = \infty. \quad (13)$$

В этом случае формула (11) упрощается и плотность распределения случайной величины Φ запишется в следующем виде [11]:

$$f(\Phi) = \frac{1}{\sigma_{\varphi} \sqrt{2 \cdot \pi}} \cdot \exp \left[-\frac{(\Phi - M\Phi)^2}{2 \sigma_{\varphi}^2} \right]. \quad (14)$$

Выражение (12), соответственно, тоже упрощается и вероятности P_0 и P_1 не застревания машины будут определяться уже по формуле [11]:

$$P = \frac{1}{2} + \tilde{\Phi} \left(\frac{M\Phi}{\sigma_{\varphi}} \right). \quad (15)$$

Для определения по формуле (15) вероятностей не застревания P_0 и P_1 необходимо вычислить величины $M\Phi$ и σ_{φ} для начала и конца

выхода ПМ на берег. При определении этих величин учтем следующие факторы:

– совместная работа сухопутного движителя (СД) и водоходного движителя (ВД) в начале выхода;

– ограничение тяги СД по сцеплению с грунтом и по двигателю;

– возможность остановки двигателя (двигатель глохнет).

Распределение мощности по СД и ВД при их совместной работе зависит как от характеристик самих движителей, так и от устройства и передаточных чисел трансмиссии. Определим мощности на ВД и СД:

$$N_{\text{в}} = \gamma \cdot N_{\text{дв}}, \quad (16)$$

$$N_{\text{с}} = (1 - \gamma) \cdot N_{\text{дв}}, \quad (17)$$

где $N_{\text{в}}$ — мощность, потребляемая ВД;

γ — коэффициент распределения мощности двигателя;

$N_{\text{с}}$ — мощность, потребляемая СД;

$N_{\text{дв}}$ — мощность двигателя.

При изменении γ в процессе выхода из воды изменяется величина $N_{\text{в}}$ и, естественно, сила тяги ВД — $P_{\text{в}}$. Как правило, $P_{\text{в}}$ зависит от частоты вращения винта (насоса) ВД линейно, а функция $N_{\text{в}}$ от частоты вращения винта (насоса) ВД представляет собой кубическую параболу [9]. Тогда, при изменении γ в x раз, величина $P_{\text{в}}$ изменится в $x^{1/3}$ раз. При движении ПМ на плаву $\gamma = 1$. В начале выхода, когда работают оба движителя $\gamma < 1$ и сила тяги ВД равна

$$P_{\text{в}} = P_{\text{в1}} \cdot \sqrt[3]{\gamma}, \quad (18)$$

где $P_{\text{в1}}$ — сила тяги ВД на плаву при $\gamma = 1$.

При определении силы тяги СД будем учитывать, с одной стороны, ограничения по двигателю, с другой стороны, по сцеплению с грунтом. В расчете вероятности не застревания машины будем использовать меньшее значение из двух полученных.

Для начала выхода ПМ из воды сила тяги СД равна

$$P_{\text{с}} = 0,2 \cdot \zeta \cdot G \cdot \varphi \cdot \cos \alpha \quad (19)$$

— по сцеплению с грунтом,

$$P_{\text{с}} = \frac{(1 - \gamma) \cdot N_{\text{дв}}}{V} \quad \text{— по двигателю.} \quad (20)$$

В конце выхода, когда работает только СД и сила плавучести $Q = 0$, сила тяги СД равна

$$P_{\text{с}} = \zeta \cdot G \cdot \varphi \cdot \cos \alpha \quad \text{— по сцеплению,} \quad (21)$$

$$P_{\text{с}} = G \quad \text{— по двигателю.} \quad (22)$$

Ограничение силы тяги $P_{\text{с}}$ по двигателю значением веса машины G обусловлено тем, что на низшей передаче удельная тяга ПМ, как правило, близка к единице [8, 9]. Данное ограничение возможно только при довольно больших значениях ζ и φ .

В случае, когда в расчет берется сила тяги СД, ограниченная по двигателю, проводится проверка условия прекращения работы двигателя. Если при этом общий баланс сил отрицательный ($\Phi < 0$), то двигатель ПМ не преднамеренно останавливается.

Сила сопротивления воды движению R действует на машину только в начале выхода, определяется по формуле:

$$R = \varepsilon \cdot B \cdot T \cdot V^2, \quad (23)$$

где B — ширина корпуса ПМ;

T — величина осадки по корпусу.

Коэффициент сопротивления воды движению ε для ПМ обычно находится в пределах 250...500 кг/м³. Меньшее значение берется для машин, имеющих обтекаемую форму корпуса. При движении ПМ на мелководье значение коэффициента сопротивления ε задается максимальным [8].

Сила сопротивления грунта движению P_f и сила сопротивления подъему P_i вычисляются по следующим формулам:

– для начала выхода:

$$P_f = 0,2 \cdot \zeta \cdot G \cdot f \cdot \cos \alpha, \quad (24)$$

$$P_i = 0,2 \cdot \zeta \cdot G \cdot \sin \alpha, \quad (25)$$

– для конца выхода:

$$P_f = \zeta \cdot G \cdot f \cdot \cos \alpha, \quad (26)$$

$$P_i = \zeta \cdot G \cdot \sin \alpha. \quad (27)$$

Учитывая, что $M\Phi = \Phi$ ($M\zeta$, $M\varphi$, Mf , $M\alpha$), а также используя выражения (2) и (18)–(27), в окончательном виде для математического ожи-

дания случайной величины Φ получим следующие формулы:

– для начала выхода

$$M\Phi_0 = \min \left\{ \begin{array}{l} 0,2 \cdot M\zeta \cdot G \cdot M\varphi \cdot \cos(M\alpha) \\ (1-\gamma) \cdot N_{\text{дв}} / V \end{array} \right\} + (28)$$

$$+ P_{\text{вл}} \cdot \sqrt[3]{\gamma} + T_{\text{д}} - 0,2 \cdot M\zeta \cdot G \cdot (Mf \cdot \cos(M\alpha) + \sin(M\alpha)) - \varepsilon \cdot B \cdot T \cdot V^2,$$

– для конца выхода

$$M\Phi_1 = \min \left\{ \begin{array}{l} M\zeta \cdot G \cdot M\varphi \cdot \cos(M\alpha) \\ G \end{array} \right\} + (29)$$

$$+ T_{\text{д}} - M\zeta \cdot G \cdot (Mf \cdot \cos(M\alpha) + \sin(M\alpha)),$$

где $M\zeta, M\varphi, Mf, M\alpha$ — математические ожидания случайных величин $\zeta, \varphi, f, \alpha$.

В связи с принятием дополнительного допущения о независимости друг от друга случай-

ных величин $\zeta, \varphi, f, \alpha$, формула (9) для расчета среднеквадратических отклонений случайной величины Φ для начала и конца выхода примет следующий вид:

$$\sigma_{\Phi} = \sqrt{(A_1 \cdot \sigma_1)^2 + (A_2 \cdot \sigma_2)^2 + (A_3 \cdot \sigma_3)^2 + (A_4 \cdot \sigma_4)^2}. \quad (30)$$

Среднеквадратические отклонения величин $\zeta, \varphi, f, \alpha$ постоянны и равны [12]:

$$\sigma_1 = 0,1; \sigma_2 = 0,06; \sigma_3 = 0,026; \sigma_4 = 1,3^\circ = 0,023 \text{ рад.}$$

Выражения для определения частных производных A_i ($i = 1, 2, 3, 4$) приведены в таблице.

Рассчитанные по формулам (28)–(30) значения $M\Phi_0, M\Phi_1, \sigma_{\Phi_0}$ и σ_{Φ_1} подставляем в формулу (15) и вычисляем вероятности не застревания P_0 и P_1 соответственно в начале и в конце выхода. Вероятность выхода ПМ из воды на берег определяем по минимуму этих вероятностей по формуле (5).

Таблица

Частные производные функции Φ по переменным $\zeta, \varphi, f, \alpha$

Частная производная A_i	Формула для расчета значения частной производной A_i	
	тяга СД ограничена по сцеплению с грунтом	тяга СД ограничена по двигателю
Начало выхода ПМ из воды на берег		
$A_1 = \frac{\partial \Phi_1}{\partial \zeta} =$	$0,2 \cdot G \cdot (\varphi \cdot \cos \alpha - f \cdot \cos \alpha - \sin \alpha)$	$-0,2 \cdot G \cdot (f \cdot \cos \alpha + \sin \alpha)$
$A_2 = \frac{\partial \Phi_0}{\partial \varphi} =$	$0,2 \cdot \zeta \cdot G \cdot \cos \alpha$	0
$A_3 = \frac{\partial \Phi_0}{\partial f} =$	$-0,2 \cdot \zeta \cdot G \cdot \cos \alpha$	
$A_4 = \frac{\partial \Phi_0}{\partial \alpha} =$	$-0,2 \cdot \zeta \cdot G \cdot (\varphi \cdot \sin \alpha - f \cdot \sin \alpha + \cos \alpha)$	$0,2 \cdot \zeta \cdot G \cdot (f \cdot \sin \alpha - \cos \alpha)$
Конец выхода ПМ из воды на берег		
$A_1 = \frac{\partial \Phi_1}{\partial \zeta} =$	$G \cdot (\varphi \cdot \cos \alpha - f \cdot \cos \alpha - \sin \alpha)$	$-G \cdot (f \cdot \cos \alpha + \sin \alpha)$
$A_2 = \frac{\partial \Phi_1}{\partial \varphi} =$	$\zeta \cdot G \cdot \cos \alpha$	0
$A_3 = \frac{\partial \Phi_1}{\partial f} =$	$-\zeta \cdot G \cdot \cos \alpha$	
$A_4 = \frac{\partial \Phi_1}{\partial \alpha} =$	$-\zeta \cdot G \cdot (\varphi \cdot \sin \alpha - f \cdot \sin \alpha + \cos \alpha)$	$\zeta \cdot G \cdot (f \cdot \sin \alpha - \cos \alpha)$

Выводы

Предложенная математическая модель процесса выхода ПМ из воды на берег предоставит возможность проводить количественную оценку проходимости машины при преодолении мелководных участков водных преград, ещё на этапе проектирования образца ПМ, при различных физико-механических свойствах грунтов и при любом угле наклона берега. Использование данной математической модели позволит сократить экономические затраты на проведения натурных испытаний.

Литература

1. Крят В.М. Методика оценки водных преград / В.М. Крят. — М.: Воениздат. 1978. 160 с.
2. Степанов А.П. Проектирование амфибийных машин / А.П. Степанов. — М.: Мегалион. 2007. 420 с.
3. Концепция боевой плавающей машины морской пехоты [Отчет]: отчет о НИР, шифр «Концепция» (заключ.): 06–02 / Отв. исполнитель О.А. Серяков. — Омск: ОТИИ. 2010. 100 с. Инв. № 2519.
4. БТВТ. Плавающие машины гусеничные и колесные: типовая методика испытаний на плаву / ФГУ «38 НИИИ МО РФ». — М.: Кубинка. 2010. 67 с.
5. Малахов Д.Ю. Разработка методики оценки гидродинамического воздействия на плавающие машины, входящие в прибойную зону: дис. канд. техн. наук. — М. 2009. 200 с.
6. Саломатин П.А. Исследование выхода на берег плавающего автомобиля: дис.канд. техн. наук. — М. 1980. 232 с.
7. БТВТ. Плавающие машины. Методика оценки проходимости на мелководе / в.ч. 68054. — М.: Кубинка. 1990. 25 с. Инв. № 4203.
8. Аксенов П.В. Плавающие колесные и гусеничные машины / П.В. Аксенов, Ю.А. Кононович. — М.: Воениздат. 1963. 269 с.
9. Степанов А.П. Конструирование и расчет плавающих машин / А.П. Степанов. — М.: Машиностроение. 1983. 200 с.
10. Серяков О.А. Вероятностная математическая модель в задачах оценки проходимости амфибиями мелководной зоны: статья / О.А. Серяков А.В. Шаховцов, К.О. Серяков / Наука и военная безопасность. № 3 (18). 2019. С. 46–52.

11. Вентцель Е.С. Теория вероятностей и ее инженерные приложения / Е.С. Вентцель, Л.А. Овчаров. — М.: Наука. 1988. 480 с.

12. Методические положения по оценке вероятности выхода на берег плавающей машины [Текст]: отчет о НИР (заключ.): 06–02. — М.: МАДИ. 1989. 48 с.

References

1. Kryat V.M. Method of water barriers assessment / V.M. Kryat. — M.: Voenizdat. 1978. 160 p.
2. Stepanov A.P. Design of amphibious machines / A.P. Stepanov. — M.: Megalion. 2007. 420 p.
3. The concept of a marine combat floating vehicle [Report]: research report, code «Concept» (conclusion.): 06-02 / OTV. performer O.A. Seryakov. — Omsk: OTII. 2010. 100 p. Inv. № 2519.
4. BTW. Floating tracked and wheeled vehicles: a standard test procedure afloat / FSU «38 NIИ MO RF». — M.: Kubinka. 2010. 67 p.
5. Malakhov D.U. Entry of amphibious machines into the water of the surf zone: dis. cand. of techn. sciences. — M. 2009. 200 p.
6. Salomatin P.A. Investigation of the exit to the shore of a floating car: dis. cand. of techn. sciences. — M. 1980. 232 p.
7. BTW. Floating vehicle. Methodology for assessing patency in shallow water / v.ch. 68054. — M.: Kubinka. 1990. 25 p. Inv. № 4203.
8. Aksenov P.V. Floating wheeled and tracked vehicles / P.V. Aksenov, Yu.A. Kononovich. — M.: Voenizdat. 1963. 269 p.
9. Stepanov A.P. Design and calculation of floating machines / A.P. Stepanov. — M.: Mashinostroenie. 1983. 200 p.
10. Seryakov O.A. Probabilistic mathematical model in the problems of assessing the patency of amphibians in the shallow water zone: article / O.A. Seryakov, A.V. Shakhovtsov, K.O. Seryakov / Science and military security. № 3 (18). 2019. P. 46–52.
11. Wentzel E.S. Probability theory and its engineering applications / E.S. Wentzel, L.A. Ovcharov. — M.: Science. 1988. 480 p.
12. Methodological provisions for assessing the probability of a floating vehicle coming ashore [Report]: research report (conclusion.): 06–02. — M.: MADI. 1989. 48 p.