

УДК 629.576

DOI: 10.37890/jwt.vi86.685

Проблемы классификации скоростных амфибийных судов комбинированного типа

А.В. Февральских

ORCID 0000-0002-5959-7994

Е.М. Грамузов

Ю.А. Карпиков

*Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева, г.
Нижний Новгород, Россия*

Аннотация. За более чем вековую историю развития судов с аэродинамическим поддержанием появилось множество различных архитектурно-конструктивных типов: от глиссирующих судов на воздушной подушке (СВП) до тяжелых экранопланов и судов, сочетающих экранное крыло с воздушной подушкой. Одним из ключевых преимуществ использования аэродинамического поддержания является возможность обеспечения амфибийности, то есть движения судна и над водой, и над твердой поверхностью. Тенденция комбинации принципов движения на воздушной подушке с использованием положительного влияния экранного эффекта получила активное развитие в последние десятилетия и связана она, главным образом, со стремлением достичь высокой скорости крейсерского движения и грузоподъемности при умеренной энерговооруженности. Проблема классификации судов с аэродинамическим поддержанием внутреннего и смешанного плавания, использующих комбинацию различных принципов движения (на воздушной подушке и под действием экранного эффекта), исходит из необходимости разработки научно обоснованных подходов к их проектированию и освидетельствованию, включая требования к конструкции и методам расчета с учетом требований по безопасности эксплуатации. В работе приведен обзор архитектурно-конструктивных типов СВП, экранопланов и судов, комбинирующих движение на воздушной подушке с использованием положительного влияния экранного эффекта, предложена классификация скоростных амфибийных судов и некоторые решения, направленные на разработку правил постройки скоростных амфибийных судов, которые не учитываются в действующих правилах постройки СВП и экранопланов.

Ключевые слова: скоростное амфибийное судно, судно на воздушной подушке, экраноплан, классификация судов

Classification of high-speed amphibious vessels of mixed type

Andrey V. Fevral'skikh

ORCID 0000-0002-5959-7994

Eugeny M. Gramuzov

Yuriy A. Karpikov

ORCID: 0009-0003-6669-8958

Nizhny Novgorod State Technical University n.a. R.E. Alekseev, Nizhny Novgorod, Russia

Abstract. Over more than century-long history of aerodynamically assisted vessels, numerous architectural and design types have emerged: from planing hovercraft (HVS) to heavy ground effect craft and vessels combining a ground effect wing with an air cushion. One of the key advantages of using aerodynamic assisted vessels is the ability to provide amphibious capabilities, enabling movement on shallows and ice, and the ability to independently reach unimproved shores. The trend of combining hovercraft propulsion principles with the positive effects of the ground effect has rapidly developed in recent decades and is primarily driven by the desire to achieve high cruising speeds and cargo

capacity with moderate power-to-weight ratios. The problem of classifying aerodynamically assisted vessels using a combination of different propulsion principles stems from the necessity to develop scientific approaches to their design, including design requirements and calculation methods considering operational safety requirements. The paper provides an overview of the architectural and structural types of hovercraft, wing-in-ground effect vehicles, and vessels combining air cushion movement with the use of positive influence of ground effect, and proposes a classification of high-speed amphibious vessels, and some solutions aimed at developing rules for the construction of high-speed amphibious vessels that are not taken into account in the current rules considering construction of hovercraft and wing-in-ground effect vehicles.

Keywords: high-speed amphibious vessel, air-cushion vehicle, wing-in-ground effect vehicle, vessel classification

Введение

В соответствии с определениями Российского Классификационного Общества [1]:

– СВП – судно на воздушной подушке (air-cushion vehicle), скеговое или амфибийное, т.е. судно, вес которого или его значительная часть как при движении, так и без движения может поддерживаться постоянно нагнетаемой воздушной подушкой, эффективность которой зависит от близости поверхности, над которой находится судно;

– экраноплан – многорежимное судно на динамической воздушной подушке, которое в своем основном эксплуатационном режиме летит с использованием «экранного эффекта» над водной или иной поверхностью, без постоянного контакта с ней, и поддерживается в воздухе, главным образом, аэродинамической подъемной силой, генерируемой на воздушном крыле (крыльях), корпусе, или их частях (аэродинамическая несущая система), которые предназначены для использования действия «экранного эффекта»;

– экранный эффект — создание динамической воздушной подушки, образуемой под аэродинамической несущей системой экраноплана путем нагнетания в эту область воздуха набегающим потоком, что при разрежении над верхней плоскостью воздушных крыльев создает повышенное давление под их нижней плоскостью, возможное на высотах от нескольких сантиметров до нескольких метров над водной или иной поверхностью, когда возмущения, приводящие к росту давления, достигают земли (воды), отражаются и успевают дойти до крыльев.

Основным документом, регламентирующим классификацию скоростных амфибийных судов, является документ под названием «Правила классификации и постройки судов» [2]. Классификация судов на воздушной подушке, согласно этому документу, осуществляется в зависимости от ветро-волнового режима бассейна эксплуатации. Действующие Правила классификации и постройки экранопланов распространяются на суда водоизмещением до 50 тонн, которые эксплуатируются в навигационный период в бассейнах разрядов «Л», «Р», «О», «М» и которые в зависимости от режима волнения и загруженности судоходных линий могут изменять режимы движения: плавание, глиссирование, экранный полет [2]. Важно отметить, что режим движения на воздушной подушке принципиально отличается от режима экранного полета главным образом ввиду того, что судно на воздушной подушке проявляет амфибийные свойства «на стопе», а экраноплан становится «амфибийным» только после взлета. Это отличие влияет на вид зависимостей сопротивления движению этих судов от числа Фруда [3-7]. «Правила классификации и постройки судов» в действующей редакции не распространяются на суда, сочетающие в аэрогидродинамической компоновке воздушную подушку и экранное крыло, хотя, их освидетельствование допускается при условии предоставления дополнительных данных – результатов экспериментальных или расчетных исследований. Кроме того, применительно к движению в режиме экранного полета в действующих «Правилах»

отсутствует понятие критериев устойчивости движения, в том числе – общеупотребимых критериев продольной статической устойчивости [8; 9], впервые опубликованных Иродовым Р.Д. ещё в 1970 году.

Эти обстоятельства являются достаточным основанием для пересмотра классификации скоростных амфибийных судов и разработки правил постройки скоростных амфибийных судов комбинированного типа.

Архитектурно-конструктивные типы судов на воздушной подушке

В настоящее время не существует единой общепринятой классификации архитектурно-конструктивных типов судов на воздушной подушке. В работе Бенуа Ю.Ю. [10] рассматривается классификация судов по принципу взаимодействия с водной средой в процессе движения: различают суда с полным отрывом от воды, с частичным отрывом от воды и суда без отрыва от воды. Данная классификация приобретает дополнительную актуальность в связи с развитием скоростных амфибийных судов комбинированного типа, поскольку такие суда могут двигаться как с полным отрывом от воды на режиме экранного полета, так и с частичным отрывом или без отрыва от воды на режиме хода на воздушной подушке, в зависимости от транспортной задачи. Также в работе [10] предложена классификация 5 типов СВП, различающихся по схеме создания воздушной подушки:

1. СВП с общей подкупольной камерой.
2. СВП с подачей воздуха через кольцевые сопла, расположенные по периметру воздушной подушки.
3. СВП с лабиринтным уплотнением циркулирующего воздушного потока.
4. СВП с воздушной смазкой – тонким слоем воздуха между днищем и водной поверхностью.
5. СВП с рубкой в виде экранного крыла, использующего экранный эффект для частичной разгрузки.

В качестве примера судна пятого типа из вышеперечисленных указан аппарат Т.П. Каарио (рисунок 1), предложенный в 1935 году. Пример аппарата Т.П. Каарио показывает, что идея создания скоростных амфибийных судов комбинированного типа возникла ещё на заре развития судов с аэродинамическим поддержанием.

В конструкциях известных скоростных амфибийных судов комбинированного типа воздушная подушка создается одним из двух способов: 1) с помощью отдельного вентилятора (СВП типа 1 по классификации Бенуа Ю.Ю. [10]); 2) с помощью маршево-поддувного устройства. ВП второго типа принято называть «динамической», а ВП первого типа можно назвать «статической», имея в виду, что парение на такой подушке возможно без движения судна, т.е. «на стопе».

В работе [11] достаточно много внимания уделено классификации гибкого ограждения воздушной подушки. Выделены следующие классификационные признаки:

1. Место расположения гибкого ограждения под днищем.
2. Схема формирования воздушной подушки.
3. Применение механизации управления гибким ограждением.
4. Особенности применения основных конструктивных элементов ограждения.

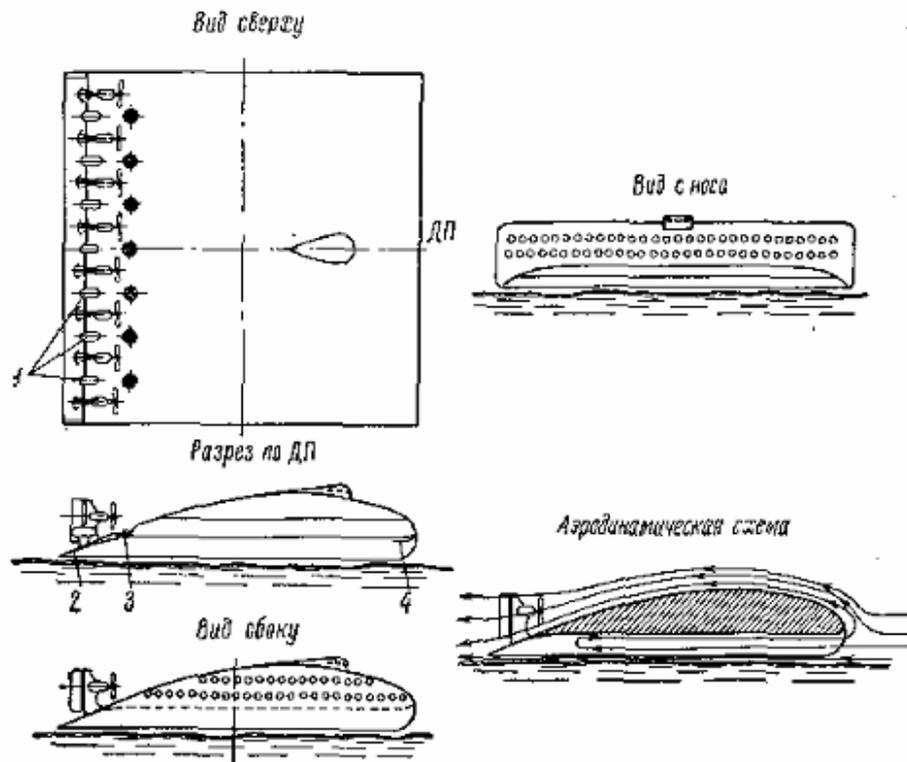


Рис. 1. Судно на воздушной подушке с рубкой в виде экранного крыла Т.П. Каарио [10]: 1 – маршевые двигатели, 2 – кормовое ограждение, 3 – нагнетающие вентиляторы, 4 – носовое ограждение

Предложены классификации в зависимости от схемы формирования воздушной подушки и в зависимости от применения основных конструктивных элементов. Несмотря на высокую информативность материала работы [11], важно отметить, что в известных конструкциях скоростных амфибийных судов комбинированного типа используется баллонетное или скеговое ограждение [12], поскольку такой тип ограждения представляется более удобным в исполнении (по сравнению с сегментированной юбкой) и позволяет обеспечивать наименьшее значение аэродинамического сопротивления движению судна и наименьшее влияние аэроупругости на устойчивость движения. Однако, вопрос применения других типов ограждения в конструкции скоростных амфибийных судов комбинированного типа остается открытым.

Также открытым остается вопрос и о возможности учета классификационных признаков, приведенных в работе [11], в действующих правилах классификации и постройки судов, однако, в пользу актуальности данного вопроса свидетельствует, в том числе, факт отсутствия в правилах положений, определяющих требования по устойчивости движения СВП, на которую, в первую очередь, влияет схема создания воздушной подушки и конструкция ограждения. Устойчивость движения СВП, в соответствии с положениями работы [13], сформулирована в виде требования, выраженного неравенством (1).

$$x_G > x_P \quad (1)$$

x_G – абсцисса центра тяжести, x_P – абсцисса центра давления, отсчитанные в диаметральной плоскости в направлении от носа в корму судна.

На практике использование неравенства (1) в классификационной деятельности и освидетельствовании СВП не представляется нерешаемой задачей, поскольку положение центра давления при равномерном распределении давления в области воздушной подушки может быть определено как геометрический центр воздушной подушки в плане, о чем указано и в работе [13].

Другой проблемой освидетельствования СВП является достоверное определение аэрогидродинамического сопротивления движению на различных режимах волнения. Разработка аналитических подходов к решению этой задачи для каждой схемы воздушной подушки представляется задачей чрезмерно трудоемкой, однако в качестве современного универсального метода определения сопротивления движению СВП можно рассматривать методы численного моделирования гидродинамики на основе решения уравнений Навье-Стокса, реализованные в пакетах программ цифровой поддержки процессов жизненного цикла [12; 14]. В связи с развитием импортозамещения, на смену пакетам программ Star CCM+ и Ansys в практике отечественного судостроения приходит отечественный аналог FlowVision, который позволяет решать задачи моделирования корабельной гидродинамики [15] при значительно меньших требованиях к вычислительной технике за счет использования квази-однофазного подхода.

Архитектурно-конструктивные типы экранопланов

Наиболее распространенный тип классификации экранопланов опирается на аэродинамическую схему компоновки [4;5;12]. Различают:

- самолетную схему;
- схему утка;
- схему тандем;
- схему «летающее крыло»;
- схему «составное крыло».

В соответствии с классификацией Международной морской организации, по возможностям движения относительно экранной поверхности различают экранопланы следующих типов [16]:

– Тип А: экраноплан, предназначенный для эксплуатации только вблизи экранной поверхности. Конструкция такого судна должна исключать возможность движения над экраном на высоте, превышающей значение высоты h_g : это значения высоты величина коэффициента подъемной силы составляет 1,1 величины коэффициента подъемной силы вне влияния экрана (при $h \rightarrow \infty$);

– Тип В: экраноплан, предназначенный для эксплуатации в условиях влияния экранного эффекта и способный выходить за пределы влияния экранного эффекта на высоту, не более 150 м для обхода препятствий;

– Тип С: аналогичен экраноплану типа В и отличающийся возможностью движения на высоте более 150 м над экраном.

В работе [12] предложена следующая классификация экранопланов по взлетной массе: легкие (до 10 тонн), средние (10-100 тонн) и тяжелые (более 100 тонн). Основанием для данной классификации послужил анализ характеристик экранопланов различных проектов и потребностей в пассажирских перевозках по внутренним водным путям.

Кроме того, в работе Рождественского К.В. [5] предложена классификация типов положительного влияния экранного эффекта по категориям влияния геометрии крыла: преимущественного влияния хорды крыла на возникновение экранного эффекта и преимущественного влияния размаха крыла. Первый тип влияния экранного эффекта, за счет хорды крыла, приводит к увеличению вблизи экрана как коэффициента подъемной силы, так и коэффициента аэродинамического сопротивления. Однако, за счет более интенсивного прироста коэффициента подъемной силы по сравнению с

коэффициентом аэродинамического сопротивления, наблюдается прирост аэродинамического качества крыла при его движении вблизи экрана, по сравнению с движением вне экрана. Во втором случае прирост аэродинамического качества наблюдается, в основном, за счет снижения индуктивного сопротивления. Этот эффект продемонстрировал Февральских А.В. в работе [12] при исследовании компоновок судов, использующих положительное влияние экранного эффекта, с различными значениями удлинения крыла. Однако, как было показано в работе [12], для экранопланов с удлинением крыла больше 3,5, более остро встает вопрос обеспечения собственной продольной устойчивости движения, чем для экранопланов с крылом малого удлинения.

Обеспечение устойчивости движения экраноплана основывается на удовлетворении критериев взаимного расположения аэродинамических фокусов по высоте, углу тангажа и положения центра масс – критериев Иродова-Жукова-Февральских. В работе [8] Иродов показал, что положение аэродинамических фокусов и центра масс экраноплана на режиме устойчивого установившегося полета определяется следующими неравенствами (2).

$$\begin{cases} X_H - X_\alpha < 0 \\ X_G - X_\alpha < 0 \end{cases} \quad (2)$$

В системе неравенств (2): X_H - абсцисса аэродинамического фокуса по высоте, X_α - абсцисса аэродинамического фокуса по углу, X_G - абсцисса центра тяжести. Координаты отсчитаны в плоскости средней аэродинамической хорды от носка крыла в направлении хвостика. Жуковым В.И. [17; 18] эмпирически было установлено, что рекомендуемые значения для величины межфокусного расстояния $\Delta X = X_\alpha - X_H$ составляют 0,05...0,15 величин средней аэродинамической хорды. В дальнейшем [19] Февральских А.В. более строго обосновал требования, предъявляемые к межфокусному расстоянию, и показал их связь с величиной коэффициента подъемной силы в виде неравенства (3).

$$\Delta X < c_y S_H \quad (3)$$

В неравенстве (3): c_y - коэффициент подъемной силы, S_H – половина второй производной коэффициента момента тангажа по коэффициенту подъемной силы при заданном значении угла тангажа.

Для определения характерных зависимостей аэродинамических характеристик экранопланов от параметров движения над экраном и компоновочных размерений накоплен достаточно обширный объем методических материалов и данных, систематизированный, главным образом, в работах [4; 12; 19; 20]. Рекомендации использования материалов этих работ, а также других материалов, прошедших экспертный анализ, могли бы существенно уточнить и конкретизировать существующие правила классификации и постройки, тем самым, обеспечив необходимую для судостроителей определенность в части требований к экранопланам. Одновременно с этим, развиваются подходы и к численному моделированию аэродинамики экранных судов с использованием отечественных программ численного моделирования [23], которые хорошо подходят для определения семейства зависимостей аэродинамических характеристик и их производных, в том числе, характеристик устойчивости полета.

Сравнение действующих правил постройки и классификации экранопланов с результатами обзора различных предложенных типов классификации показывает, что действующие правила [2] напрямую, без проведения дополнительных исследований, распространяются только на легкие экранопланы типа А. При этом, например, возникают трудности с регистрацией сверхлегких беспилотных экранопланов,

которые, ввиду своих малых размеров и малой высоты движения над экраном, в соответствии с классификацией Международной морской организации могут принадлежать только к типам В или С. Таким образом, результаты обзора открытых источников по проблеме классификации экранопланов выявляют как минимум следующие существенные недостатки действующей классификационной документации:

1. Необходимость уточнения определения «экранного эффекта» в нормативных документах с точки зрения влияния на несущие свойства крыла или обводов судна.
2. Отсутствие определения требований к конструкции (размерений элементов компоновки) в части обеспечения экранных свойств регистрируемого судна.
3. Определение требований по устойчивости движения на режиме экранного полета, определяемых геометрическими соотношениями элементов компоновки.

Классификация скоростных амфибийных судов комбинированного типа

В конструкции первого серийного легкого пассажирского экраноплана «Волга-2» (рисунок 2) соединялись технические решения, направленные на использования преимуществ движения на воздушной подушке и использования положительного влияния экранного эффекта (по классификации работы [10] – СВП типа 5). Воздушная подушка на старте создавалась движительно-поддувным устройством винтокольцевого типа с направляющим аппаратом. Движение на крейсерской скорости выполнялось, в основном, за счет аэродинамической силы, формируемой набегающим потоком на крыле.



Рис. 2. Экраноплан «Волга - 2» [24]

В дальнейшем идеи соединения воздушной подушки и экранного крыла в компоновках скоростных амфибийных судов получили развитие в ряде проектов: ЦАГИ, Hoverwing, Swan и других (рисунок 3).



(a) судно на воздушной подушке-эканоплан проекта ЦАГИ [25]



(b) судно проекта Hoverwing [26]



(c) судно проекта SWAN [27]

Рис. 3. Проекты скоростных амфибийных судов с воздушной подушкой и экранным крылом

Характеристики судов приведены в таблице 1.

Таблица 1

Характеристики скоростных амфибийных судов комбинированного типа

ЛТХ	Волга-2	Hoverwing UH-19XRW	751 Swan
Масса максимальная взлетная, т	2,950	1,066	8,1
Скорость крейсерская, км/ч	120	96	130
пассажироместимость	8	4	15
Длина, м	11	7,76	19
Ширина, м	8	7,32	13,4
Мощность двигателей полная, л.с.	300	256	630
Тип ВП	динамическая	статическая	динамическая
Страна-производитель	СССР	США	Китай

Приведенные в таблице 1 характеристики показывают, что на уровне стохастического исследовательского проектирования не выявлено устойчивых корреляций между несущими свойствами, размерениями и энерговооруженностью судов различных проектов.

В настоящее время не существует общепринятого подхода к классификации судов такого типа, однако, опираясь на опыт классификации СВП и экранопланов, можно выделить некоторые ключевые признаки, присущие скоростным амфибийным судам комбинированного типа: способ создания воздушной подушки (статическая – с помощью отдельного нагнетателя, или динамическая – с помощью движительно-

поддувного устройства) и компоновка несущего крыла (монокрыло или составное крыло). Составное крыло включает центроплан, нижняя поверхность которого частично или полностью занята воздушной подушкой, и консоли, на которых создается подъемная сила только за счет встречного потока. Наличие составного крыла в компоновке скоростного амфибийного судна комбинированного типа существенно влияет на характеристики устойчивости движения, поскольку аэродинамические характеристики консоли определяют положение аэродинамических фокусов, но не меняют положения центра давления воздушной подушки. Схематически совокупность требований по обеспечению продольной устойчивости движения скоростного амфибийного судна комбинированного типа можно представить в виде рисунка 4. Требования по соотношению абсцисс центра давления ВП и фокуса по высоте в настоящее время остаются не вполне проработанными, однако, можно предположить, что положение центра давления воздушной подушки ближе к хвосту крыла в сечении средней аэродинамической хорды по сравнению с положением фокуса по высоте будет более предпочтительным ввиду двух обстоятельств:

- 1) при таком соотношении абсцисс на режиме перехода от воздушной подушки к экранному полету судно будет приобретать дополнительный момент на кабрирование;
- 2) по мере набора высоты и уменьшении вклада воздушной подушки в формирование подъемной силы с одновременным увеличением вклада аэродинамики несущего крыла абсцисса фокуса по высоте будет увеличиваться, достигнув совпадения с абсциссой центра давления.

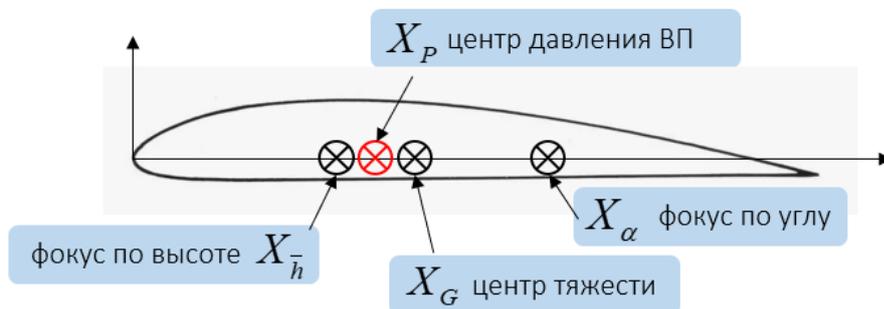


Рис. 4. Схема требований по обеспечению продольной устойчивости движения скоростного амфибийного судна комбинированного типа

Важно отметить, что замедление развития проектов скоростных амфибийных судов комбинированного типа, наблюдаемое в последние годы, связано, в том числе, и с рядом проектных ошибок, таких, как избыточная стреловидность несущего крыла, нерациональная компоновка центроплана и консоли, низкий уровень проработанности компоновки в части аэрогидродинамического сопротивления, управления движительно-поддувным устройством, обеспечения устойчивости движения и др. Этих ошибок можно было бы частично избежать при наличии научно-обоснованных правил классификации и постройки скоростных амфибийных судов комбинированного типа.

Исходя из проведенного анализа, рационально предложить следующую обобщенную классификацию скоростных амфибийных судов (рисунок 5).

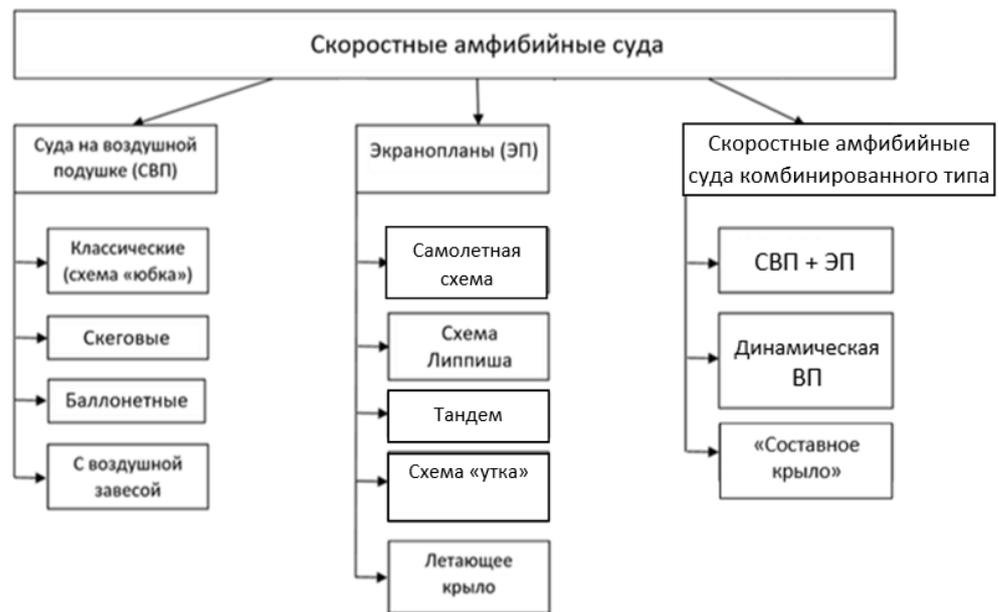


Рис. 5. Схема обобщенной классификации скоростных амфибийных судов

В классификационной схеме, представленной на рисунке 5, в качестве основного классификационного признака выбраны архитектурно-конструктивные особенности компоновки, определяющие обеспечение нужных значений аэрогидродинамического качества и собственной устойчивости крейсерского движения на ранних стадиях проектирования. В более общем подходе к составлению классификационной схемы скоростных амфибийных судов необходимо учитывать следующие признаки:

- массу при полной загрузке;
- мореходность;
- назначение судна;
- тип движителя;
 - минимальную и максимальную достигаемую дальность автономного хода при полной загрузке;
- ледовую ходкость;
- способность обеспечения заданных ходовых качеств при обледенении;
- геометрические характеристики обводов;
- маневренность;
- амфибийность (возможность движения по различным типам подстилающей поверхности);
- другие свойства.

Составление такой классификационной схемы является объемной и достаточно сложной работой, практической целью которой станет определение правил классификации и освидетельствования судов, проектирование которых на основе действующих нормативных документов остается сложной задачей для судостроительных компаний. Результаты анализа опубликованных научных трудов показывают возможность организации такой работы на их основе.

Заключение

Сочетание принципов движения с использованием положительного влияния экранного эффекта и воздушной подушки в проектах современных скоростных

амфибийных судов приводит к необходимости разработки общих «Правил постройки и классификации скоростных амфибийных судов», которые должны опираться на существующую нормативную базу с учетом необходимости ее расширения, обусловленной накоплением новых научно-технических знаний об этом виде техники. Разработка единой формализованной методики освидетельствования скоростных амфибийных судов различных типов – СВП, экранопланов и судов комбинированного типа – является достаточно сложной задачей, однако, к текущему моменту сформирован существенный научно-технический базис для ее решения.

В работе выполнен анализ классификаций архитектурно-конструктивных типов судов на воздушной подушке и экранопланов, и предложена единая классификация скоростных амфибийных судов, включая суда комбинированного типа. Классификация опирается на наиболее существенные компоновочные признаки, выделяя в качестве основной проблемы обеспечения безопасности эксплуатации скоростных амфибийных судов комбинированного типа сочетание требований по устойчивости движения на воздушной подушке и на режиме экранного полета.

Разработка общих правил «Постройки и классификации скоростных амфибийных судов» позволит не только определить проектные требования, но и помочь избежать ошибок проектирования скоростных амфибийных судов комбинированного типа, необходимых для обеспечения круглогодичной связанности отдаленных территорий Арктики, Сибири и Дальнего Востока, включая порты Северного Морского пути, с крупными населенными пунктами и промышленными центрами.

Список литературы

1. Инструкция по учету судов, плавучих объектов: ИР-03-2022 Версия 4.5 // Российское Классификационное Общество. – URL: https://rfclass.ru/uploads/unifitsirovannyj_klassifikator_tipov_grupp_i_vidov_sudov-4_5.pdf (дата обращения 06.11.2025).
2. Правила классификации и постройки судов // Российское Классификационное Общество. – URL: https://rfclass.ru/uploads/pkps/pkps_rko_vvedeny_v_dejstvie_s_07-09-2025.pdf (дата обращения 06.11.2025).
3. Белавин, Н.И. Экранопланы / Н.И. Белавин. – Л.: Судостроение, 1977. – 232 с.
4. Маскалик, А.И. Экранопланы: транспортные суда 21 века / А.И. Маскалик, Р.А. Нагапетян, В.В. Иваненко, А.Г. Бутлицкий, В.В. Томилин, А.И. Лукьянов. – СПб.: Судостроение, 2005. – 576 с. – ISBN 5-7355-0668-4.
5. Rozhdestvensky, K.V. Wing-in-ground effect vehicles / K.V. Rozhdestvensky // Progress in aerospace sciences. – № 42. – 2006. – pp. 211-283.
6. Плисов, Н.Б. Аэрогидродинамика судов с динамическими принципами поддержания / Н.Б. Плисов, К.В. Рождественский, В.К. Трешков. – Л.: Судостроение, 1991. – 247 с.
7. Демешко, Г.В. Проектирование судов. Амфибийные СВП: Учебник. В 2-х кн. Кн. 1. / Г.В. Демешко. – СПб: Судостроение, 1992. – 269 с.
8. Иродов, Р.Д. Критерии продольной устойчивости экраноплана / Р.Д. Иродов // Ученые записки ЦАГИ – 1970. – №4. – Т.1. – с.63-72.
9. Fevral'skikh, A.V. A development of longitudinal static stability analysis method of a WingIn-Ground effect vehicle in cruise during the design process / A. V. Fevral'skikh // Ocean Engineering, 2021, номер статьи 110187, 10.1016/j.oceaneng.2021.110187.
10. Бенуа, Ю.Ю. Суда на воздушной подушке / Ю.Ю. Бенуа, В.М. Корсаков. – Л.: Судпромгиз, 1962. – 121 с.
11. Кользаев, Б.А. Справочник по проектированию судов с динамическими принципами поддержания / Б.А. Кользаев, А.И. Косоруков, В.А. Литвиненко // Л.: Судостроение, 1980. – 472 с.
12. Февральских, А.В. Разработка методики проектирования аэрогидродинамической компоновки амфибийного судна на воздушной подушке с аэродинамической разгрузкой на основе численного моделирования : специальность 05.08.01 "Теория корабля и строительная механика" : диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук / Февральских Андрей Владимирович, 2017. – 175 с.

13. Демешко, Г.В. Проектирование судов. Амфибийные СВП: Учебник. В 2-х кн. Кн. 1. / Г.В. Демешко. – СПб: Судостроение, 1992. – 269 с.
14. Phan Anh Tuan. A Study on Hovercraft Resistance Using Numerical Modeling / Applied Mechanics and Materials, Vol. 842, pp 186-190.
15. Аксенов, А.А. Использование приповерхностных сеток для численного моделирования вязкостных явлений в задачах гидродинамики судна / А.А. Аксёнов, В.И.Похилко, А.П.Моряк // Компьютерные исследования и моделирование. – 2023. – Т. 15. – № 4. – С. 995–1008.
16. Guidelines for wing-in-ground craft / International Maritime Organization <https://wwwcdn.imo.org/localresources/en/OurWork/Safety/Documents/MSC.1-CIRC.1592.pdf> (дата обращения 22.11.2025).
17. Kornev, N. Complex numerical modeling of dynamics and crashes of wing-in-ground-vehicles / N. Kornev, K. Matveev // American Institute of Aeronautics and Astronautics. – 2003. – AIAA Paper 2003-600. – pp.1-9.
18. Жуков, В.И. Особенности аэродинамики, устойчивости и управляемости экраноплана / В.И. Жуков. - М.: Издательский отдел ЦАГИ, 1997.
19. Fevralskikh, A.V. A development of longitudinal static stability analysis method of a Wing-In-Ground effect vehicle in cruise during the design process / A. V. Fevralskikh // Ocean Engineering, 2021, номер статьи 110187, 10.1016/j.oceaneng.2021.110187.
20. Rozhdestvensky, K.V. Aerodynamics of a lifting system in extreme ground effect / K.V. Rozhdestvensky // Heidelberg: Springer, 2000, p. 352.
21. Панченков, А.Н. Экспертиза экранопланов / А.Н. Панченков, П.Т. Драчев, В.И. Любимов. – Н. Новгород: Издательство «Поволжье», 2006. – 655 с.
22. Февральских, А.В. Проектирование аэродинамической компоновки экраноплана с использованием технологий цифрового двойника / А.В. Февральских // Морской вестник. – 2021. – № 3(79). – с. 14-20.
23. Февральских А.В. Численное моделирование обледенения крыла малого удлинения в условиях действия экранного эффекта / А.В. Февральских // Наука и бизнес: пути развития. – № 9(159). – С. 16-21.
24. Экраноплан «Волга-2» // Авиационная энциклопедия «Уголок неба». – URL: <https://airwar.ru/enc/sea/volga2.html> (дата обращения 23.11.2025).
25. Агуреев, П.А. Динамически подобная модель амфибийного летательного аппарата / П.А. Агуреев, А.О. Бондарев, А.В. Усов, С.В. Ходунов // Материалы XXXI Научно-Технической Конференции по Аэродинамике, ЦАГИ, 29-30 октября 2020 года.
26. Hoverwing 19XRW // 19XR Sport & 19XRW Hoverwing Description. – URL: <https://www.flyhovercraft.com/blank-page> (дата обращения 23.11.2025).
27. Экранопланы по схеме Р.Е. Алексева типа КМ // Опытные экранопланы типа 751 SWAN. – URL: https://ekranoplan.ru.narod.ru/C61.htm?utm_medium=organic&utm_source=yandexsmartcamera (дата обращения 23.11.2025).

References

1. Instrukciya po uchetu sudov, plavuchih ob"ektov: IR-03-2022 Versiya 4.5 // Rossijskoe Klassifikacionnoe Obshchestvo. – URL: https://rfclass.ru/uploads/unifitsirovannyj_klassifikator_tipov_grupp_i_vidov_sudov-4_5.pdf (data obrashcheniya 06.11.2025).
2. Pravila klassifikacii i postrojki sudov // Rossijskoe Klassifikacionnoe Obshchestvo. – URL: https://rfclass.ru/uploads/pkps/pkps_rko_vvedeny_v_dejstvie_s_07-09-2025.pdf (data obrashcheniya 06.11.2025).
3. Belavin, N.I. Ekranoplany / N.I. Belavin. – L.: Sudostroenie, 1977. – 232 s.
4. Maskalik, A.I. Ekranoplany: transportnye suda 21 veka / A.I. Maskalik, R.A. Nagapetyan, V.V. Ivanenko, A.G. Butlickij, V.V. Tomilin, A.I. Luk'yanov. – SPb.: Sudostroenie, 2005. – 576 s. – ISBN 5-7355-0668-4.
5. Rozhdestvensky, K.V. Wing-in-ground effect vehicles / K.V. Rozhdestvensky // Progress in aerospace sciences. – № 42. – 2006. – pp. 211-283.
6. Plisov, N.B. Aerogidrodinamika sudov s dinamicheskimi principami podderzhaniya / N.B. Plisov, K.V. Rozhdestvenskij, V.K. Treshkov. – L.: Sudostroenie, 1991. – 247 s.

7. Demeshko, G.V. Proektirovanie sudov. Amfibijnye SVP: Uchebnik. V 2-h kn. Kn. 1. / G.V. Demeshko. – SPb: Sudostroenie, 1992. – 269 c.
8. Irodov, R.D. Kriterii prodol'noj ustojchivosti ekranoplana / R.D. Irodov // Uchenye zapiski CAGI – 1970. – №4. – T.1. – s.63-72.
9. Fevralskikh, A.V. A development of longitudinal static stability analysis method of a WingIn-Ground effect vehicle in cruise during the design process / A. V. Fevralskikh // Ocean Engineering, 2021, nomer stat'i 110187, 10.1016/j.oceaneng.2021.110187.
10. Benua, Yu.Yu. Suda na vozduшной podushke / Yu.Yu. Benua, V.M. Korsakov. – L.: Sudpromgiz, 1962. – 121 s.
11. Kolyzaev, B.A. Spravochnik po proektirovaniyu sudov s dinamicheskimi principami podderzhaniya / B.A. Kolyzaev, A.I. Kosorukov, V.A. Litvinenko // L.: Sudostroenie, 1980. – 472 s.
12. Fevral'skih, A.V. Razrabotka metodiki proektirovaniya aerogidrodinamicheskoy komponovki amfibijnogo sudna na vozduшной podushke s aerodinamicheskoy razgruzkoj na osnove chislenogo modelirovaniya : special'nost' 05.08.01 "Teoriya korablya i stroitel'naya mekhanika": dissertaciya na soiskanie uchenoj stepeni kandidata tekhnicheskikh nauk / Fevral'skih Andrej Vladimirovich, 2017. – 175 s.
13. Demeshko, G.V. Proektirovanie sudov. Amfibijnye SVP: Uchebnik. V 2-h kn. Kn. 1. / G.V. Demeshko. – SPb: Sudostroenie, 1992. – 269 c.
14. Phan Anh Tuan. A Study on Hovercraft Resistance Using Numerical Modeling / Applied Mechanics and Materials, Vol. 842, pp 186-190.
15. Aksenov, A.A. Ispol'zovanie pripoverhnostnyh setok dlya chislenogo modelirovaniya vyazkostnyh yavlenij v zadachah gidrodinamiki sudna / A.A. Aksyonov, V.I.Pohilko, A.P.Moryak // Komp'yuternye issledovaniya i modelirovanie. – 2023. – T. 15. – № 4. – S. 995–1008.
16. Guidelines for wing-in-ground craft / International Maritime Organization <https://wwwcdn.imo.org/localresources/en/OurWork/Safety/Documents/MSC.1-CIRC.1592.pdf> (data obrashcheniya 22.11.2025).
17. Kornev, N. Complex numerical modeling of dynamics and crashes of wing-in-ground-vehicles / N. Kornev, K. Matveev // American Institute of Aeronautics and Astronautics. – 2003. – AIAA Paper 2003-600. – pp.1-9.
18. Zhukov, V.I. Osobennosti aerodinamiki, ustojchivosti i upravlyaemosti ekranoplana / V.I. Zhukov. - M.: Izdatel'skij otdel CAGI, 1997.
19. Fevralskikh, A.V. A development of longitudinal static stability analysis method of a Wing-In-Ground effect vehicle in cruise during the design process / A. V. Fevralskikh // Ocean Engineering, 2021, nomer stat'i 110187, 10.1016/j.oceaneng.2021.110187.
20. Rozhdestvensky, K.V. Aerodynamics of a lifting system in extreme ground effect / K.V. Rozhdestvensky // Heidelberg: Springer, 2000, p. 352.
21. Panchenkov, A.N. Ekspertiza ekranoplanov / A.N. Panchenkov, P.T. Drachev, V.I. Lyubimov. – N. Novgorod: Izdatel'stvo «Povolzh'e», 2006. – 655 s.
22. Fevralskih, A.V. Proektirovanie aerodinamicheskoy komponovki ekranoplana s ispol'zovaniem tekhnologij cifrovogo dvojnika / A.V. Fevral'skih // Morskoj vestnik. – 2021. – № 3(79). – c. 14-20.
23. Fevral'skih A.V. Chislennoe modelirovanie obledeneniya kryla malogo udlineniya v usloviyah dejstviya ekrannogo effekta / A.V. Fevral'skih // Nauka i biznes: puti razvitiya. – № 9(159). – S. 16-21.
24. Ekranoplan «Volga-2» // Aviacionnaya enciklopediya «Ugolok neba». – URL: <https://airwar.ru/enc/sea/volga2.html> (data obrashcheniya 23.11.2025).
25. Agureev, P.A. Dinamicheski podobnaya model' amfibijnogo letatel'nogo apparata / P.A. Agureev, A.O. Bondarev, A.V. Usov, S.V. Hodunov // Materialy XXXI Nauchno-Tekhnicheskoy Konferencii po Aerodinamike, CAGI, 29-30 oktyabrya 2020 goda.
26. Hoverwing 19XRW // 19XR Sport & 19XRW Hoverwing Description. – URL: <https://www.flyhovercraft.com/blank-page> (data obrashcheniya 23.11.2025).
27. Ekranoplany po skheme R.E. Alekseeva tipa KM // Opytnye ekranoplany tipa 751 SWAN. – URL: https://ekranoplan-ru.narod.ru/C61.htm?utm_medium=organic&utm_source=yandexsmartcamera (data obrashcheniya 23.11.2025).

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ / INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Февральских Андрей Владимирович, д.т.н., доцент кафедры «Энергетические установки и тепловые двигатели», Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева (ФГБОУ ВО НГТУ им. Р.Е. Алексеева), 603155, г. Нижний Новгород, ул. Минина, 24, e-mail: a.fevralskih@gmail.com

Andrey V. Fevralskikh, Doctor of Technical Sciences, Associate Professor of the Department «Power plants and heat engines», Nizhny Novgorod State Technical University n.a. R.E. Alekseev, 24, Minin Street, Nizhny Novgorod, 603155

Грамузов Евгений Михайлович, д.т.н., профессор кафедры «Кораблестроение и авиационная техника», Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева (ФГБОУ ВО НГТУ им. Р.Е. Алексеева), terkor54@mail.ru

Eugeny M. Gramuzov, Doctor of Technical Sciences, Professor of the Department «Shipbuilding and aviation technology», Nizhny Novgorod State Technical University n.a. R.E. Alekseev, 24, Minin Street, Nizhny Novgorod, 603155

Карпиков Юрий Андреевич, аспирант кафедры «Энергетические установки и тепловые двигатели», Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева (ФГБОУ ВО НГТУ им. Р.Е. Алексеева), 603155, г. Нижний Новгород, ул. Минина, 24, e-mail: yourockkarp@mail.ru

Yuriy A. Karpikov, graduate student of the Department «Power plants and heat engines», Nizhny Novgorod State Technical University n.a. R.E. Alekseev, 24, Minin Street, Nizhny Novgorod, 603155

Статья поступила в редакцию 04.12.2025; принята к публикации 05.02.2026; опубликована онлайн 20.03.2026. Received 04.12.2025; published online 20.03.2026.