

В.Н.ХРАМУШИН, А.С.КОРЫТКО

Исследование путей создания сверхмалого телеуправляемого корабля

Сверхмалые телеуправляемые корабли, как новые средства робототехники, способны провести гидрофизические измерения в самых сложных условиях прибрежного или штормового плавания, практически не оказывая влияния на окружающую водную среду. Проектирование таких кораблей приводит к междисциплинарным исследованиям в области морской аэрогидромеханики, автоматической навигации и гидрометеорологии, нацеленным на поиск непротиворечивых технических решений. Показаны особенности использования плавниковых движителей гидробионики, дающих повышение проходимости и скрытности, в том числе в сложных условиях плавания. Обсуждается вопрос о высокоскоростном гидрофизическом модуле с повышенным запасом плавучести, способном активно маневрировать в условиях интенсивного морского волнения. Признается оптимальным проект полупогружного надводного корабля, способного длительное время находиться в открытом море.

Shipbuilding researches for a small autonomous hydrophysical vessel. V.N.KHRAMUSHIN, A.S.KORYTKO (Special Design Office of the Aids of Marine Research Automation, FEB RAS, Yuzhno-Sakhalinsk).

Self-guided marine measurement vehicle projects, being new sea robotics, are designed for observation in harbor, offshore and in sea bays, including the sail in heavy swell condition, where presence of a seaman can be technically impossible or dangerous. This defines theoretical and experimental researches in the field of ship fluidmechanics, stormy seaworthiness and automatic navigation of a vehicle, which are necessary for reliable on-board measurement and telemetric equipments work. Particularities of flipper hydrobiology propulsion device, giving increase of passabilities and hiding of vehicle, including in heavy condition of the sail are shown. The problem of highvelocity hydrophysical vehicles, which have large floatability, capable of active maneuver in the heavy swell condition of sail is discussed. The traditional tumblehome ship hull, capable of long voyage on open sea, is considered optimal.

Для морских исследований весьма эффективным может быть использование малогабаритных автоматизированных плавсредств, способных выполнять поставленные задачи в штормовых условиях открытого моря, в сложных в навигационном отношении прибрежных акваториях, в том числе с соблюдением повышенных мер безопасности, экологической чистоты и скрытности обследования водной поверхности.

В результате выполнения в 2001–2003 гг. НИР СКБ САМИ ДВО РАН «Поисковые исследования нетрадиционных решений по оптимизации формы корпуса корабля для повышения эксплуатационных и боевых качеств» [5] показана принципиальная возможность сохранения требуемых мореходных качеств корабля в условиях интенсивного морского волнения. Это может быть использовано и при создании сверхмалых кораблей (самоходных гидрофизических модулей), несущих на борту контрольно-измерительное оборудование и управляемых из удаленных береговых или корабельных информационных центров. Возможность одновременного применения нескольких самоходных модулей, синхронно работающих в системе единого времени, существенно повышает эффективность комплексного мониторинга больших по площади морских и прибрежных акваторий.

ХРАМУШИН Василий Николаевич – кандидат технических наук, КОРЫТКО Андрей Семенович (СКБ средств автоматизации морских исследований ДВО РАН, Южно-Сахалинск).

Основу проводимых исследований составляет поиск новых математических моделей для определения динамики корабля, штормового моря, атмосферы и их взаимодействия, необходимых для оптимизации формы корпуса с позиций наилучшей мореходности. Параллельно решаются технические задачи по размещению агрегатов телемеханики, навигационного и гидрофизического измерительного оборудования; по выработке законов автоматического управления автономным модулем, в том числе в сложных и штормовых условиях плавания.

Важнейшим элементом теоретических и экспериментальных исследований является поиск путей создания надежных движителей, обеспечивающих поддержание хода как в штормовом море, так и на мелководьях и в сильно загрязненных или заросших водорослями акваториях, движителей, сохраняющих работоспособность после ударов о причальные стенки, ледовые поля и камни на морском дне. Известные технические решения в виде водометов или гребных колес в этой работе не рассматриваются, хотя их практическое использование в составе гидрофизических модулей совсем не исключается. В 2005 г. построен и прошел первые успешные испытания новый вариант плавникового движителя. Это позволило перейти от чисто теоретических исследований нестационарной гидродинамики машущего крыла к построению конкретных математических моделей для проектирования и оптимизации параметров работы новых движителей в различных эксплуатационных условиях.

Малые размеры самоходных гидрофизических модулей требуют особого внимания к их мореходности, так как даже малое волнение для них подобно штормовому для крупных судов. В то же время малые корабли имеют важные преимущества перед полноразмерными судами и гидрографическими катерами с человеком на борту. Относительно высокая прочность, полная герметичность и абсолютная остойчивость их корпусов позволяют не опасаться ни ударов о морское дно в прибойной зоне у побережья, ни мгновенных опрокидываний в вихревом потоке под гребнями крупных морских волн. Масштабные эффекты гидродинамики дают возможность успешно применять здесь нетрадиционные типы машущих и гибких плавниковых движителей из морской биогидродинамики [2]. В данном направлении известны различные инженерно-прикладные исследования, по крайней мере с 1897 г. доступны сведения об изобретениях (но к гидромеханике они имеют весьма далекое отношение), однако математическая часть, особенно касающаяся нестационарной гидродинамики таких движителей, практически не разработана. Это делает актуальным исследование и развитие вычислительных экспериментов в гидромеханике по моделированию вихреобразования в поле машущего крыла, ведущих к оптимальному проектированию и отработке эффективных режимов эксплуатации новых движителей. В этом направлении в лаборатории вычислительной гидромеханики и океанографии СКБ САМИ ДВО РАН выполняются теоретические разработки для построения прямых численных моделей гидромеханики с использованием тензорных формализаций [1] известного метода «крупных частиц жидкости» [3].

Оптимальные проекты телеуправляемых гидрофизических модулей

Проектируемые и испытываемые в СКБ САМИ ДВО РАН сверхмалые корабли предназначены для проведения следующих морских работ:

- синхронные измерения гидрофизических параметров на акваториях портов и гаваней, в прибрежной полосе и устьях рек, в районах проведения морских работ в шельфовой зоне;

- картирование параметров состояния морских вод и построение батиметрических карт при поиске фарватеров и планировании гидротехнических работ;

- выполнение контрольных и охранных функций на подходах к базам флота при проведении поиска подвижных и заякоренных подводных объектов;

- экологическое обследование поверхности морских акваторий, получение информации об опасных морских явлениях или контроль состояния аварийных инженерных сооружений, выполнение других морских работ, участие человека в которых невозможно, опасно или нежелательно.

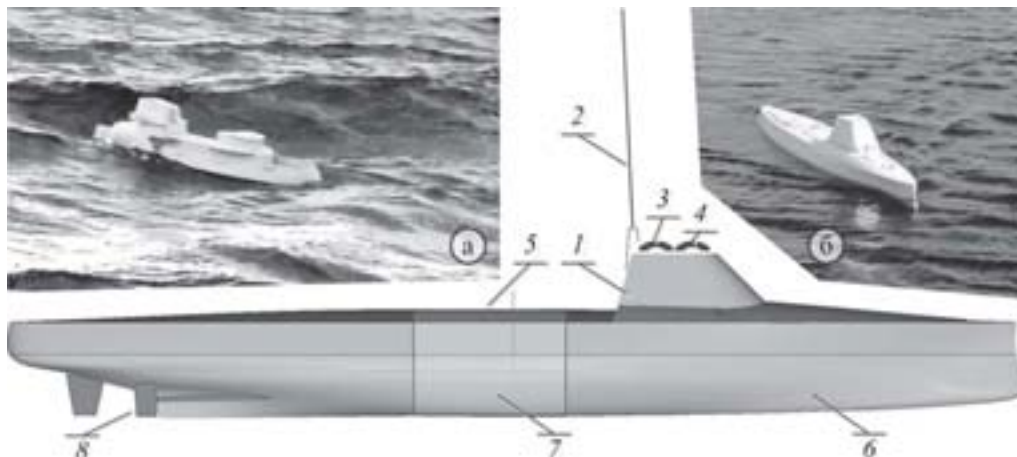


Рис. 1. Эскиз общего расположения самоходного телеуправляемого гидрофизического модуля, оптимизированного для плавания в условиях интенсивного морского волнения и предназначенного для проведения комплексных гидрографических обследований морских и прибрежных акваторий. а – телеуправляемый модуль в открытом море, б – первые испытания гидрофизического модуля водоизмещением 65 кг; 1 – рубка для радиооборудования и систем видеонаблюдения, 2 – антенна сетевого радиомоста (11 Мб), 3 – антенна дальней связи «Гонец», 4 – антенна навигационной системы «GPS-Глонасс», 5 – палуба, покрываемая солнечными батареями, 6 – носовой приборный отсек, 7 – отсек для размещения гидролокатора бокового обзора, 8 – движители в насадках с горизонтальными балерами для активной стабилизации бортовой и килевой качки

К настоящему времени проводятся исследования мореходных качеств для двух вариантов автономных кораблей:

1) телеуправляемый самоходный модуль (рис. 1а), обеспечивающий обследование морских и портовых акваторий с непрерывной доставкой измерительной информации по радиоканалам на единый пост управления и анализа данных, размещаемый на борту сопровождающего гидрографического судна или на побережье. Водоизмещение 20 кг при полезной приборной нагрузке 5 кг, длина корпуса 1,6 м, скорость экономичного хода 2–3 узла, автономность до 8 ч;

2) сверхмалый автономный корабль (рис. 1б), способный преодолевать расстояния до 1 000 морских миль под программным управлением установленной на его борту ЭВМ. Самостоятельно решая определенный круг задач в удаленных морских и прибрежных акваториях, такой модуль может периодически высылать сообщения о своем техническом состоянии и передавать текущую океанографическую информацию по спутниковым каналам связи. Водоизмещение 65 кг при полезной приборной нагрузке 10 кг, длина корпуса 2,6 м, скорость хода 3–4 узла, автономность до 300 ч.

Успешное маневрирование автономного модуля в штормовых условиях, для изучения которых он собственно и создается, не может поддерживаться традиционным человеческим опытом по штормовому управлению судном. Своевременные решения о курсе и скорости хода должны приниматься автоматически непосредственно на борту автономного модуля с использованием специальных математических моделей, прогнозирующих динамику взаимодействия корпуса с фронтами ближайших штормовых волн. Такие математические модели, по мере их адаптации к реальной динамике корпуса на крупном морском волнении, позволят оптимизировать условия активного хода корабля-робота, заблаговременно настраивая параметры автоматического управления исполнительными механизмами его маршевых двигателей, рулей и стабилизаторов качки.

На рис. 2 показан вариант моделирования штормовой поверхности моря, когда групповые структуры ветровых волн и волн зыби наиболее активны и следуют ячейстыми порядками с

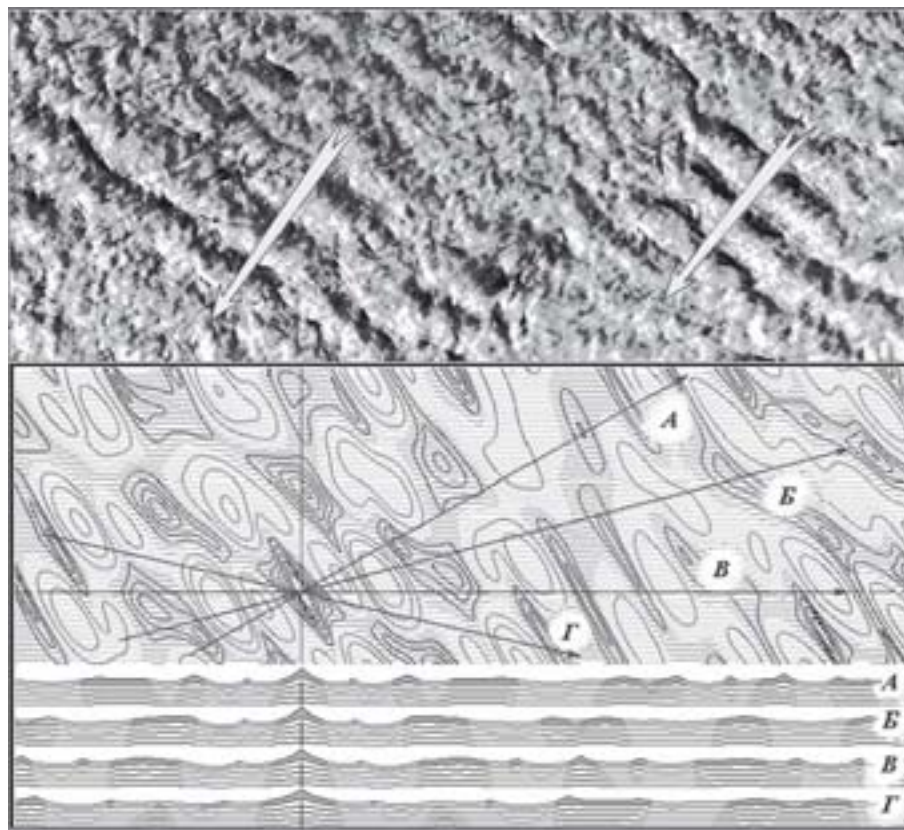


Рис. 2. На аэрофотоснимке (вверху) стрелками отмечены две тройки наиболее крупных ветровых волн («девяток валов»). Ниже приведено волновое поле математической модели, представляющей наложение трех ячейисто-групповых структур трохидальных волн: ветровых ($\lambda = 60$ м, $\tau = 6,2$ с, $h = 7,2$ м, $A = 250^\circ$); первой и второй систем зыби ($\lambda = 100$ м, $\tau = 8,0$ с, $h = 5,9$ м, $A = 210^\circ$ и $\lambda = 160$ м, $\tau = 10,1$ с, $h = 5,1$ м, $A = 270^\circ$). Изолинии уровня моря проведены через 2 м. Курс движения судна в направлении А ведет навстречу ветровому волнению, курсы Б, В и Г – на 15° , 30° и 45° вразрез волне. В нижней части рисунка показаны профили волн на отмеченных курсах А, Б, В и Г

одинаково высокой амплитудой. Оценивая характер штормового волнения на приведенной иллюстрации, заключаем, что своевременным выбором курса и скорости хода можно существенно снизить вероятность встречи с наиболее крупными девятыми валами штормового волнения. Для идентификации параметров волнения и краткосрочного прогноза наиболее близких к модулю крупных волн могут быть использованы бортовые инклинометры и пьезогироскопы, непрерывно анализирующие динамику килевой и бортовой качки и способные оптимизировать лавирование между гребнями волн и рыскание автономного модуля на курсе.

Варианты использования машущих плавниковых движителей

Мобильная морская измерительная аппаратура и средства морской робототехники могут стать более эффективными в случае использования малошумных движителей, обладающих повышенной надежностью и проходимостью при плавании в прибойной зоне и в сильно загрязненных или заросших водорослями акваториях. Явными техническими решениями для построения таких движителей представляются естественные аналоги морской гидробионики [4] – различные виды машущих и гибких плавниковых движителей.

В Китае, других странах Дальнего Востока, в Африке активно используется реальный прототип рассматриваемого здесь плавникового движителя. Это известное с античных

времен кормовое весло (рис. 3), единственно способное обеспечить безопасное плавание, поддержание курса и скорости хода в условиях крупного морского волнения и интенсивной бортовой качки гребного судна.

Рассмотрим две модификации машущих движителей, пригодных для использования в составе самоходных гидрофизических модулей: жесткий пластинчатый плавниковый движитель (рис. 4) и кормовое машущее крыло с активно деформируемой поверхностью, работающее по принципу крыла ската (рис. 5).

На рис. 4 показан принцип действия уже испытанного *пластинчатого (синусоидального) движителя* с жестким крылом, размещенного внутри замкнутого прямоугольного короба под кормовым подзором корпуса корабля. Боковые стенки короба служат концевыми шайбами для исключения индуктивных вихрей на концах машущего крыла, а его верхняя и нижняя плоскости служат уменьшению вертикальных пульсаций корпуса при работе движителя, одновременно создавая своеобразную «реактивную» составляющую тяги в крайних положениях плоского крыла, где по условиям гидродинамической оптимизации поверхность крыла должна была бы очень сильно искривляться.

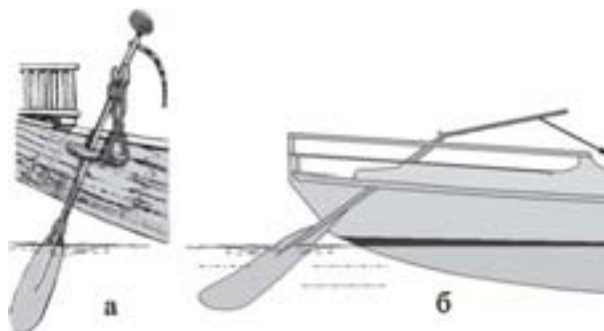


Рис. 3. Характерные тросовые крепления и изгибы рукоятки кормового весла позволяют гребцу почти автоматически регулировать угол атаки плавникового движителя, обеспечивая одинаковое усилие при плавном поперечном раскачивании весла вне зависимости от скорости хода судна. Слева приведено вертикальное весло, использовавшееся в древнем Египте, справа — современное весло китайских гребных судов, работая которым гребец одной рукой упирается в наклонное древко, а второй — выравнивая усилие — автоматически регулирует угол атаки плоского пера плавникового движителя

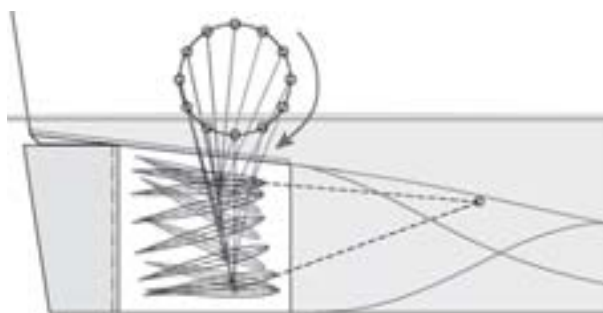


Рис. 4. Механизм работы жесткого пластинчатого машущего крыла

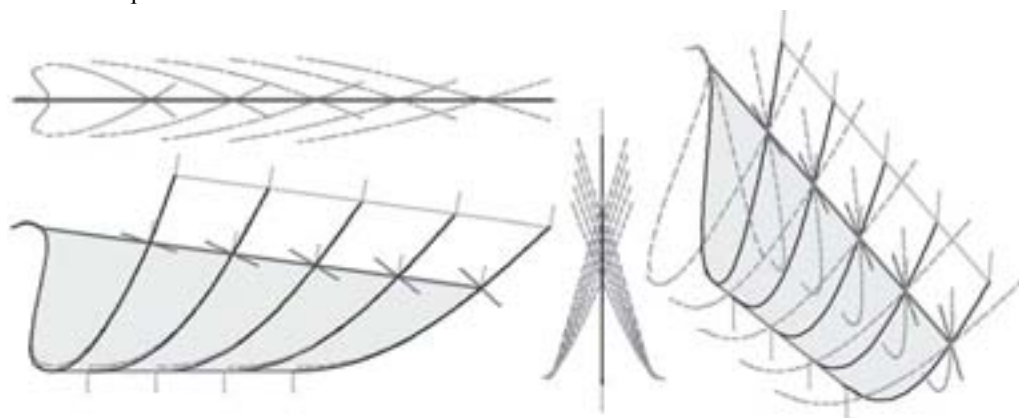


Рис. 5. Внешний вид гибкого плавникового движителя в распрямленном состоянии. Пунктиром показан характер искривления рабочей поверхности плавника при его простом наклоне

Шаг движителя (угол атаки крыла в его среднем положении) регулируется радиусом рычага и высотой кривошипного механизма, изменение которых непосредственно во время работы движителя очень сложно реализовать на практике. Другой серьезный недостаток такого движителя – невозможность герметизации самого кривошипно-шатунного механизма, отчего он должен работать в полупогруженном состоянии, что также недопустимо для реального судового движителя ввиду быстрого коррозионного износа его подвижных узлов.

Однако для приборных комплексов, работающих на поверхности воды лишь ограниченное время, такой движитель может быть весьма надежным и эффективным. Математическая модель такого движителя наиболее проста и допускает расчеты по чисто двумерным (плоским) пространственным схемам. Явные недостатки кривошипно-шатунных механизмов могут быть исключены в случае использования линейных двигателей, управляемых с помощью электронных следящих систем.

Машущий плавниковый движитель (рис. 5) представляется в виде последовательности гибких крыльевых пластин, раскачивающиеся движения которых управляются бортовым компьютером, учитывающим необходимость динамического изменения формы столь короткого крыла для минимизации индуктивных потерь на его крайней кромке.

В движении ведущее ребро несколько опережает упруго изгибающуюся плоскость гибкого крыла, что препятствует перетоку жидкости через его концевую кромку, способствуя заданной динамике вихреобразования вблизи движителя в целом. Плавниковый движитель служит и рулем, и стабилизатором качки одновременно, что достигается отклонением и искривлением средней линии плавника в процессе его рабочих раскачиваний. Плавник не теряет работоспособности при касании заиленного морского дна, продолжая отталкиваться от него змеевидными движениями.

Математическая модель гибкого движителя является чисто трехмерной и всегда нестационарной. Создаваемая в лаборатории вычислительной гидромеханики и океанографии СКБ САМИ ДВО РАН натурная модель гибкого плавника должна стать инструментом для проверки результатов численного моделирования, основанного на трехмерных тензорных моделях нестационарной гидромеханики [1].

Современная цифровая техника позволяет сформировать исполнительные механизмы для управления сложными движениями плавникового движителя, каждый из элементов которого может двигаться по строгим математическим законам, в том числе обеспечивая динамически изменяемую геометрию машущего крыла. Выполняемые натурные эксперименты со стендовыми и реальными вариантами плавниковых движителей необходимы в первую очередь для отработки новых математических моделей для автоматического регулирования кинематических параметров работы такого движителя.

Вариант быстроходного модуля с повышенным запасом плавучести

Для гидрофизического модуля с традиционным режимом надводного плавания применимы принципы непротиворечивого проектирования формы корпуса, приводящие к снижению интенсивности динамического взаимодействия между кораблем, штормовым океаном и атмосферой. Пассивная штормовая стабилизация корабля достигается за счет заострения ватерлинии в оконечностях корпуса и скругления формы шпангоутов в его средней части. Главной архитектурной особенностью такой стабилизации является исключение чрезмерных объемов в надводной части герметичного корпуса, а также всяческое снижение высоты и площади парусности палубных надстроек и мачт.

Такое ограничение неприемлемо для быстроходных надводных кораблей, воспринимающих каждую встречу с морской волной в виде жесткого гидродинамического удара. Движение же над волнами в глissiрующем режиме подразумевает значительное увеличение гидродинамического объема надводной части корпуса, форма которого не должна увлекать за собой большие присоединенные массы жидкости.

Избыточный запас плавучести, по какой бы причине он ни придавался морскому судну, всегда крайне отрицательно влияет на безопасность штормового плавания. Корпусу такого судна очень сложно придать абсолютную остойчивость (вариант с глубокопосаженным яхтенным килем всегда усиливает размах бортовой качки под действием волновых течений). Захват высокого надводного борта морской волной всегда вызывает резкую качку, слемминг, зарываемость корпуса под гребни крутых волн и, как следствие, неизбежную опасность опрокидывания в случае выхода из строя рулей или движителей. Тем не менее опыт морского судовождения показывает безопасные методы активного штормового плавания таких легко нагруженных судов. Все эти методы ориентированы на активное штормовое маневрирование корабля [5], способного противопоставить штормовой стихии энергию своих двигателей, находящихся в руках опытных мореплавателей.

Оптимальным режимом штормового плавания, в зависимости от архитектуры корпуса судна, могут быть курсы по ветру, лагом к волне, носом на волну или вразрез к гребням волн. Поддержание заданного режима плавания возможно за счет высокой эффективности движителей и надежности рулевых устройств. Весьма точное и быстрое маневрирование требует форсированного хода для уклонения от ударов обрушающихся гребней штормовых волн. В случае малого телеуправляемого корабля морские волны всегда имеют высоту больше его надводного борта, а длину – превышающую его продольные размерения. Это означает, что, при достижении высоких скоростей хода, корпус самоходного модуля будет взлетать над ложбинами волн, оголяя подводные рули и движители, и затем погружаться в гребни крутых волн, резко затормаживая свое движение вперед. В таком «прыгающем» режиме перестает работать гидроакустическая аппаратура, теряют стабильность бортовая измерительная техника и навигационное оборудование и не существует никаких способов обеспечить их работоспособность.

В «полете» между гребнями волн пространственная стабилизация и поддержание высокой скорости хода возможны только с помощью воздушных крыльевых систем и надводных движителей. Но тогда в морскую архитектуру плавающего модуля будут привнесены характерные элементы воздушного судна. Принимая во внимание повышенную турбулентность воздушных потоков на малых высотах над штормовым морем и резкость шквальных порывов в приповерхностных слоях атмосферы, невозможно достигнуть ни надежности, ни эффективности работы аэродинамических стабилизирующих систем, достаточных для сколько-нибудь плавного (безударного) движения над штормовыми волнами. Быстрота внешних воздействий и низкая скорость реагирования исполнительных механизмов и систем управления, в силу их значительной инерционности, не позволят адекватно реагировать на быстрые изменения штормовой динамики ветра и волн.

Это делает невозможным использование аэродинамических схем для низкоскоростных низколетящих экранопланов. Классические схемы для высоколетящих аэропланов также не применимы из-за высокого риска касания крыльями гребней морских волн, так как в свободном полете необходима довольно высокая скорость. Но тогда стабильное высокоскоростное движение по поверхности штормового моря оказывается принципиально невозможным.

С учетом всего этого оптимальной схемой надводного движения автономных модулей может стать только чистый воздушный полет на той высоте, где отсутствует опасное влияние штормовых волн. Для проведения запланированных измерений параметров водной среды и подводных гидроакустических промеров такой модуль должен приводняться («падать» в воду). Посадка на воду со снижением скорости полета до скорости надводного плавания невозможна без сильных ударов о поверхность воды, так как в полете нельзя оценить быстро текущие процессы на штормовой поверхности моря.

Для продолжения полета гидрофизический модуль должен начать активное маневрирование по поверхности воды с высокой скоростью хода, достаточной для своевременного уклонения от ударов и опрокидывающих воздействий со стороны гребней волн. Форсированный взлет с поверхности воды возможен в тот момент, когда математическая модель предскажет появление небольшого ровного участка на склоне волны без обрушающегося

гребня, по которому возможны разгон и стабилизированный полет над экраном в момент набора скорости, с последующим ускоренным набором высоты сразу после прыгивания с вершины волны (по аналогии со взлетом летучих рыб).

Можно сформулировать технические предложения об архитектурном облике быстроходного гидрофизического модуля. Для достижения высокой скорости хода обводы корпуса могут иметь форму «двойного клина» («морского ножа»), способствующего удерживанию рулей и движителей в стабильном потоке под кормовым подзором. Высокая энерговооруженность позволит активно стабилизировать качку корпуса на волнении, что очень важно для удержания над водой шноркелей воздухозаборников, радиоантенн и полетных крыльев. Сложенные над корпусом крылья, подобно флюгеру, помогут удерживать курс навстречу ветровой волне. Острый и высокий вертикальный форштевень позволит активно демпфировать килевую качку на встречной волне. Однако, при отклонении на косой курс относительно гребней волн, развал скулы за высоким форштевнем будет грозить катастрофическими последствиями в случае захвата корпуса волной, а вслед за этим – и полной потерей управляемости и динамической устойчивости столь высокобортного корпуса.

Даже при очень высокой энерговооруженности гидрофизический модуль не может обладать быстроходностью в надводном плавании, значительно превышающей скорость распространения характерных гребней морских волн. Соизмеримые с длиной корпуса морские волны ограничивают быстроходность величинами порядка 3–4 узлов (1,5–2 м/с).

Заключение

Оптимальными архитектурными решениями для создания телеуправляемых гидрофизических модулей следует признать проектирование хорошо обтекаемых полупогруженных корпусов (рис. 1), способных находиться в автономном плавании в открытом море в течение неограниченно длительного времени. Относительно невысокая скорость хода таких модулей вполне согласуется с требованиями по работоспособности бортовой гидроакустической и гидрофизической измерительной аппаратуры. Возможность использования плавниковых машущих движителей является одним из важнейших факторов повышения надежности и проходимости сверхмалых гидрофизических кораблей-роботов.

Для комплексного изучения мореходных свойств новых самоходных измерительных комплексов в СКБ САМИ ДВО РАН изготавливаются опытовые модели в реальном масштабе (рис. 1, а, б). Испытания их проводятся в опытовом бассейне Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета, оборудование которого приспособлено для проведения нетрадиционных исследований штормовой мореходности судов. Опытная проверка в реальных условиях плавания выполняется в морских акваториях вблизи о-ва Сахалин и в экспедициях на гидрографических судах Сахалинского дивизиона ГС РФ. В морских испытаниях одновременно изучаются технические условия по эксплуатации навигационного, гидроакустического, гидрофизического и другого измерительного оборудования, отрабатываются практические вопросы дистанционного управления сверхмалым кораблем и получения с него телеметрической информации.

ЛИТЕРАТУРА

1. Белоцерковский О.М., Давыдов Ю.М. Метод крупных частиц в газовой динамике. М.: Наука, 1982. 370 с.
2. Ву Т. О масштабном эффекте для передвижения водных животных // Биогидродинамика плавания и полета. Механика. Новое в зарубежной науке. М.: Мир, 1980. № 23. С. 79–112.
3. Романенко Е.В. Гидродинамика рыб и дельфинов. М.: Изд-во КМК, 2001. 411 с.
4. Файн А.В., Храмушин В.Н. Тензорное представление алгоритмов вычислительной гидромеханики // Вестн. ДВО РАН. 2004. № 1. С. 52–68.
5. Храмушин В.Н. Поисковые исследования штормовой мореходности корабля. Владивосток: Дальнаука, 2003. 172 с.