

---

## ПРОБЛЕМЫ КОРАБЛЕСТРОЕНИЯ И ОКЕАНОТЕХНИКИ

---

УДК 629.12.:532

Л.В. Андрианов, М.Л. Мухина

### СХЕМА ГИДРОДИНАМИЧЕСКОЙ КОМПАНОВКИ – ПРИОРИТЕТНАЯ ЗАДАЧА ПРОЕКТИРОВАНИЯ СУДНА НА ПОДВОДНЫХ КРЫЛЬЯХ

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева

Приоритетным объектом внимания конструкторов судов на подводных крыльях в начальной стадии проектирования является не корпус судна, а его гидродинамический комплекс, обеспечивающий успешную реализацию принципа движения по воде. Наиболее целесообразно проводить не отдельное, как это принято в классической теории проектирования судов, а комплексное изучение наиболее важных «мореходных качеств» судна на подводных крыльях.

*Ключевые слова:* судно на подводных крыльях, проектирование судов на подводных крыльях, схема гидродинамической компоновки судна на подводных крыльях, испытания моделей.

Начало судостроения и судоходства восходит к самым истокам человеческой цивилизации. Веками люди строили суда, корабли и другие плавающие объекты, которые теория корабля, как наука, относит к классическим объектам *водоизмещающего* типа. Только в первой половине XX столетия с началом строительства и эксплуатации глиссирующих катеров было положено ограничение на безраздельное господство Архимедовой силы поддержания. Однако революционный прорыв в этом направлении был связан с началом строительства судов на подводных крыльях (СПК).

Создание отечественных пассажирских СПК было основано на гениальном, найденном Р.Е. Алексеевым, конструктивном решении важнейшей проблемы СПК – устойчивости его движения в режиме «хода на крыльях». Эта находка заключалась в использовании эффекта изменения подъемной силы крыла в зависимости от его погружения. Данный эффект был изучен в СССР в 1933–37 годах в эксперименте с подводными крыльями и катерами, проведенными научными сотрудниками Центрального аэрогидродинамического института имени профессора Н. Е. Жуковского (ЦАГИ) А.Н. Владимировым, В.Г. Фроловым и Л.А. Эпштейном [1]. Позднее двое из них построили и испытали катер ЭГО-1, не получили на нем устойчивого хода на крыльях, а Л.А. Эпштейн увлекся другим направлением обеспечения устойчивости – автоматическим управлением углами атаки крыльев СПК [2].

Как показывает опыт Р.Е. Алексеева и Центрального конструкторского бюро по судам на подводных крыльях (ЦКБ по СПК), носящем теперь имя своего главного конструктора, создание нового СПК требует многолетнего труда опытных специалистов-экспериментаторов. Надо было: 1) найти оптимальную площадь подводных крыльев, обеспечивающую поддерживающую силу не только в режиме хода на крыльях, но и сам «выход» на крылья; 2) найти оптимальное распределение нагрузки и расстояние между ними и ЦТ судна. После того как найдены геометрические характеристики несущей системы надо 3) экспериментально определить так называемые «установочные» углы атаки крыльев, обеспечивающие «естественную» продольную и боковую устойчивость движения судна. На эту работу,

как свидетельствует один из учеников Р.Е. Алексеева – начальник проектного отдела ЦКБ по СПК В.Я. Максимов, уходило в среднем от пяти до восьми лет.

Появление в конце 50-х годов прошлого века пассажирских СПК, и организация их регулярных рейсов вызвало не только широкий общественный интерес, но и привлекло к ним внимание большого круга ученых и специалистов, в первую очередь – ученых-гидродинамиков. Начиная с 60-х до середины 80-х – это годы, которые стали временем наиболее активного изучения теории подводного крыла, гидродинамики и механики движения СПК, теории суперкавитирующих гребных винтов. По всем этим темам отечественные ученые и специалисты занимали лидирующие позиции в мире. Среди них были как представители кораблестроительных, так и авиационных исследовательских центров, вузов и конструкторских бюро.

В 1964 г. научные сотрудники гидродинамического филиала ЦАГИ им. проф. –Н.Е. Жуковского В.И. Блюмин и М.Б. Масеев в сотрудничестве с Л.А. Ивановым издали одну из первых книг, являвшихся руководством для конструкторов, занимающихся проектированием СПК. Характерной особенностью книги является тот факт, что в ней отсутствует глава, посвященная проектированию корпуса судна, а присутствует важнейшая из глав, посвященная проектированию подводных крыльев (заметим, именно «крыльев», а не «крыльевого устройства»; тем самым авторы демонстрируют «авиационный» подход к делу, начинающемуся с «Аэродинамической схемы самолета»).

Не меньше внимания было уделено в эти годы прочности корпуса и крыльевых устройств СПК. Были разработаны методики и алгоритмы, ставшие нормативными документами.

Вопросами общего проектирования СПК традиционно занимались профессиональные кораблестроители. Они искренне полагали, что специфические особенности СПК (развитая структура «выступающих частей», высокие значения удельной мощности, новые нетрадиционные материалы и технологии и др.) могут быть адаптированы и успешно встроены в уже имеющуюся методологию и алгоритмы существующей «Теории проектирования судов».

В середине прошлого века эта дисциплина представляла собой уже вполне сложившуюся прикладную науку, объектом изучения которой были *водоизмещающие* суда. В учебниках того времени она характеризовалась как наука, которая «...разрабатывает круг вопросов, связанных с определением элементов проектируемого судна» [1]. Алгоритм решения этих вопросов имеет стабильный, проверенной практикой, характер. Приоритетным объектом классической теории проектирования судов являлся и продолжает таковым быть, если речь идет о водоизмещающем судне, его корпус, в пределе – его подводная часть. Форма и пропорции последней являются каноническими, даже с учетом особенностей, связанных с назначением судна, его типажом и т.п. Архитектурно-композиционного разнообразия у водоизмещающих судов удается достичь, варьируя компоновку элементов, образующих только надводную часть объекта.

Такой же «корабельный» подход был характерен для публикаций, посвященных методологии общего проектирования СПК и вышедших в свет в упомянутый ранее период времени [3, 4, 5]. В качестве объекта первоочередного внимания в этих работах выступает корпус судна, а его гидродинамический комплекс (ГДК) номинировался поэлементно в категории «судовых устройств» и «выступающих частей».

При проектировании других видов транспортных средств нет столь жесткой заданности формы и соотношений (пропорций) главного конструктивного элемента (корпуса судна), являющегося с точки зрения архитектуры и дизайна композиционным центром объекта. Например, история автомобилестроения накопила множество вариантов формы кузова легкового автомобиля одного и того же класса. В авиации фюзеляж самолета по аналогии с корпусом судна может служить в качестве базового элемента компоновки машины, но у фюзеляжа самолета нет той функциональной гегемонии, которой обладает корпус судна. В компоновке самолета присутствуют такие крупные элементы, как крылья, оперение и двигатели.

Каждый из них имеет не менее важную по сравнению с фюзеляжем функциональную нагрузку.

Концептуальной задачей авиаконструктора, работающего над проектом нового самолета, является такая компоновка названных ранее узловых агрегатов машины, которая обеспечивает аэродинамику и летные качества самолета (взлет, посадка, устойчивость, управляемость и маневренность полета) и его прочность при минимальной взлетной массе, расходах топлива и других важных эксплуатационных показателях. Результатом этого поиска является «Схема аэродинамической компоновки самолета» или просто «Схема самолета» [6, 7]. Это чертеж или его виртуальный аналог, в которых содержится информация о геометрических формах, размерах и взаимном расположении важнейших узловых элементов, составляющих самолет как механическую систему (фюзеляж, крыло, вертикальное оперение, горизонтальное оперение, закрылки и механизация крыла, рули, двигатели на пилонах и др.). Визуальное представление о схеме самолета можно получить также по геометрически подобным моделям объекта, имеющим как демонстрационное, так и исследовательское назначение.

Авиация располагает большим разнообразием аэродинамических схем самолетов. С работы над структуризацией и синтезом аэродинамической схемы начинается работа над проектом самолета на его самых начальных этапах (предэскизное и эскизное) проектирование. Возникая вначале в сознании главного конструктора самолета, схема получает графическое или виртуальное представление и «обрастает» дополнительной информацией: эскизы внутренней компоновки самолета, принципиальные схемы, относящиеся к конструкции, системам и оборудованию машины. Прорабатываются вопросы установки (подвески) двигателя (-ей). Одновременно, в первом приближении, подсчитывается взлетная масса самолета и его центровка, выполняются аэродинамический расчет, расчет устойчивости и управляемости, производится оценка прочности (см., например, [7]). Заметим, что обязательным элементом в процессе создания «Схемы» самолета является изготовление и продувки в аэродинамической трубе его моделей. На основании результатов продувок схема уточняется, корректируются расчетная документация, уточняется масса самолета и его центровка. Заново, с учетом результатов продувок выполняются аэродинамический расчет и расчеты устойчивости. Во все времена в авиации продувки моделей самолета в аэродинамической трубе являются обязательным условием допуска машины к испытательным полетам. Это обстоятельство является свидетельством того, какое внимание уделяется эксперименту в авиации с ее чрезвычайно высоким уровнем расчетно-аналитического проектирования.

Изучение творчества Р.Е. Алексеева показывает, что разработанная им методология проектирования СПК в его начальной стадии имела структуру, идентичную рассмотренной структуре общего проектирования самолета на его ранних стадиях. Если для авиаконструктора в самом начале работы над проектом в центре внимания находилось построение аэродинамической схемы самолета, то для Р.Е. Алексеева и его последователей такой приоритетной задачей была разработка ее гидродинамического аналога.

История создания отечественного скоростного флота и методологии его проектирования позволяет сделать вывод, что разработка схемы гидродинамической компоновки СПК первых поколений осуществлялась Р.Е. Алексеевым в формате изобретательской деятельности. Первые сведения о катерах на подводных крыльях («водяных ножах») появились в СССР еще в конце 30-х годов прошлого века [8, 9]. Все свидетельствует о том, что студент-выпускник кораблестроительного факультета Р.Е. Алексеев знал об опытах итальянцев, так же, как и об опытах ЦАГИ им. проф. Н.Е. Жуковского [10]. Результаты этих опытов, которые Р.Е. Алексеев дополнил позднее собственными испытаниями подводных крыльев в научно-исследовательской гидродинамической лаборатории завода «Красное Сормово», стали практически единственным теоретическим материалом, которым располагал выдающийся конструктор, начиная свою творческую деятельность. Поэтому основным способом практического формирования ГДК как системы, стал физический эксперимент с динамически подобными буксируемыми моделями будущих СПК. Меняя геометрию, взаимное располо-

жение, в первую очередь несущей системы, внося в состав ГДК СПК новые элементы, повторяют испытания (рис. 1), стремясь к получению максимального гидродинамического качества при полном выполнении требований к мореходным качествам объекта. Итогом этих опытно-конструкторских работ становилась «Схема гидродинамической компоновки» будущего судна. Это чертеж, устанавливающий структурный состав и номенклатуру, форму и геометрические параметры узловых элементов ГДК СПК, их взаимное расположение на корпусе судна. Вновь прибегая к аналогии из авиации, будем называть его сокращенно *гидродинамической схемой* СПК.



**Рис. 1.** Буксировка модели СПК на открытом водоеме [фото из архивов автора]

Отметим, что при создании судов первого поколения этот чертеж назывался «Схемой крыльевого устройства». Начиная с 70-х годов XX века, когда ЦКБ по СПК приступило к проектированию и строительству кораблей-экранопланов, чертеж стал называться «Схемой гидродинамической компоновки» СПК-проекта. В контексте обсуждаемого вопроса о статусе ГДК СПК это изменение терминов имело знаковый характер: оно означало смену приоритетов. В качестве объекта первоочередного внимания конструкторов ЦКБ по СПК выступал уже не корпус судна, а его гидродинамическая схема.

Заметим, что и Г. Шертель, который был по характеристике Р. Макливи [11] «страстным энтузиастом авиации», при создании своих СПК, так же, как и Р.Е. Алексеев, действовал по подобному алгоритму: «выбор схемы – постройка и испытания самоходной модели – натурное судно» (рис. 2) [24].

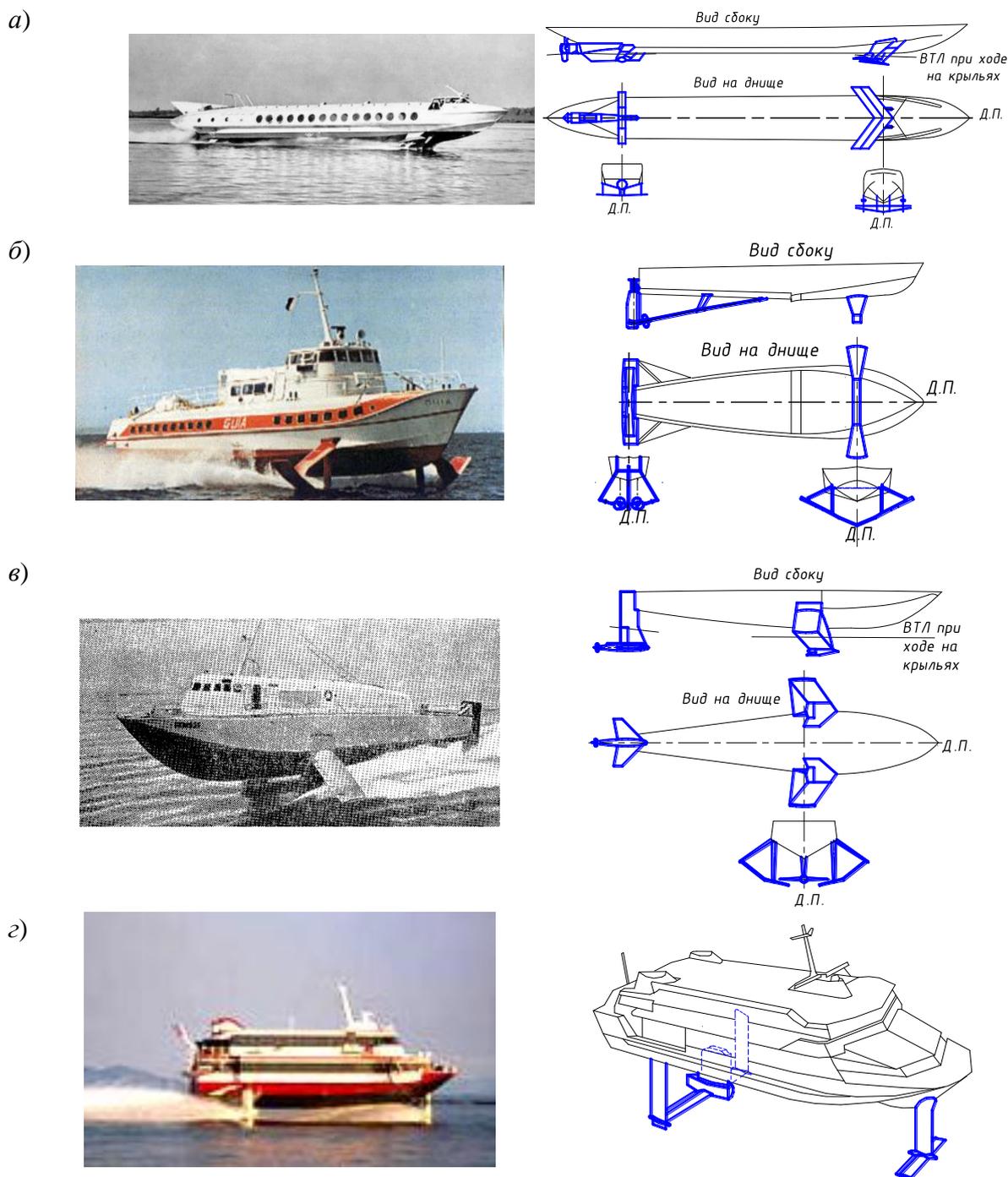


**Рис. 2.** Кинограмма испытаний самоходной модели СПК. Разгон и выход на крылья

Анализируя архитектурно-конструктивные типы СПК, принадлежащие к одной из трех мировых школ проектирования СПК (рис. 3), мы убеждаемся в правильности тезиса о базовой роли гидродинамической схемы СПК. Становится очевидным, что тип несущей системы, размеры ее продольной базы и габаритные размахи крыльев оказывают решающее влияние на выбор главных размерений корпуса и его внешний архитектурный облик.

Дальнейший анализ рис. 3 показывает, что для судна на малопогруженных подводных крыльях (СМПК) с несущей системой «тандем» и характерной для нее предельно-большой относительной базой  $L_{кр}=20$  хорд носового крыла (рис. 3, а) присущи удлиненные узкие корпуса с отношением  $L/B \approx 7$ . По мере уменьшения относительного расстояния между носовым и кормовым крылом («продольной базы схемы»), корпуса СПК становятся относительно более широкими. Их архитектура становится близкой к традиционной архитектуре морских

быстроходных катеров (рис. 3, б, в). Схема «утка», применяемая для судна на глубоководных подводных крыльях с системой автоматического управления подводными крыльями (рис. 3, г), открывает более широкие возможности для творчества конструкторов и архитекторов, проектирующих корпус СПК.



**Рис. 3. Примеры связи между архитектурными формами корпуса и типом несущей системы СПК:**

- а* – т/х «Чайка» – гидродинамическая схема «тандем», малопогруженные подводные крылья;
- б* – т/х «РТ-20» – схема «тандем», V-образные крылья, пересекающие поверхность воды;
- в* – т/х «Денисон» – схема «самолетная», два бортовых наклонных носовых крыла, пересекающих свободную поверхность воды и полностью погруженное кормовое крыло; *г* – т/х «Джетфоил» – схема «утка», глубоководные подводные крылья, система автоматизированного управления подъемными силами

Начало изучению методологии проектирования судов с динамическим принципом поддержания «по Алексееву» – методологии, основанной на тотальном использовании результатов разносторонних экспериментов, было заложено в монографии [12]. Позднее в работах В.А. Дементьева [13, 14, 15] и Б.А. Царева [16, 17] был предпринят системный анализ творческого наследия выдающегося конструктора.

Известно, что у Р.Е. Алексеева не осталось публикаций, содержащих описание разработанной им методологии проектирования СПК. В сравнительно небольшом количестве подготовленных им лично в 60–70-е годы прошлого века статей и докладов на конференциях [18, 19, 20, 21] основное внимание было уделено анализу проблем и перспективам развития скоростного судостроения. Особо заметим, что в своем выступлении на VI конференции по проектированию скоростных судов в декабре 1976 г. [20] Р.Е. Алексеев подчеркивал: «...процесс создания новых транспортных средств сопряжен с дорогами исследованиями и поисками, требует специальных лабораторий и экспериментальных баз...».

С самого начала в этих работах участвовали известные авиационные научно-исследовательские институты ЦАГИ им. проф. Н.Е. Жуковского и Центральный научно-исследовательский институт имени академика А.Н. Крылова (ЦНИИ им. акад. А.Н. Крылова), а с середины 70-х годов XX века к изучению проблем, связанных с движением вблизи границы раздела двух сред, вплотную подключились и другие подразделения бывшего Министерства судостроительной промышленности и военно-морского флота. Было вовлечено большое число ученых и специалистов-кораблестроителей. Все это не могло не повлиять на представления о приоритетах в теории проектирования СПК, как имеющей самостоятельное значение прикладной инженерной дисциплине.

Библиографический анализ публикаций на эту тему показывает, что авторы сохраняли верность рассмотренной ранее ортодоксальной концепции классической теории проектирования судов. Но, нельзя не заметить, как год от года увеличивалось внимание и значение задачи проектирования ГДК СПК. Цитируем А.М. Ваганова: «...Крыльевое устройство и его элементы должны обеспечить проектируемому СПК все основные навигационные и эксплуатационные качества...» [22]. А.И. Косоруков в монографии, имеющей статус руководства для конструкторов, после приведения развернутых алгоритмов расчетов по определению водоизмещения, главных размерений корпуса, нагрузки масс и т.д., пишет [23]: «...Перед началом расчета, на основе анализа задания, опыта постройки и эксплуатации СПК, следует выбрать принципиальную схему крыльевого устройства («самолетная», «утка» или «тандем»), несущие плоскости (полностью или частично погруженные), способ управления подъемной силой крыльев...». Ограничившись этим замечанием, А.И. Косоруков далее не приводит информации, посвященной теме выбора гидродинамической схемы СПК, а переходит сразу к определению геометрических и гидродинамических характеристик «крыльевого устройства».

В.В. Иконников и А.И. Маскалик в своей монографии [5], посвященной особенностям проектирования СПК, начинают анализ этих особенностей с выбора типа несущей системы и определения ее геометрических характеристик. Только после этого авторы переходят к построению алгоритмов с позиций классической теории проектирования судов.

Б.А. Царев, написавший свои первые работы по СПК еще в 60-е годы прошлого века, в своих последних публикациях, посвященных теории проектирования скоростных судов [16, 17], декларирует доминантную роль в этом процессе «...крыльевых и иных устройств, а также энергетики над корпусом и другими подсистемами...». Словом, речь идет о приоритетной роли ГДК в процессе проектирования СПК.

Впервые приоритетная роль подводных крыльев в тематике общего проектирования СПК была отмечена А.И. Маскаликом в монографии [12]. Только после выбора «типа крыльев», их размеров и формы, «взаимного расположения подводных крыльев» автор рекомендует приступить к проектированию корпуса, руководствуясь при этом рекомендациями классической теории проектирования судна.

В ГДК СПК входит не только несущая система («крыльевое устройство»), но и про-

пульсивная передача с работающим двигателем; рули; гидродинамические поверхности, выполняющие роль стабилизирующих устройств; механика крыльев и др. Именно ГДК, как совокупность перечисленных элементов, а не только взятая отдельно несущая система («крыльевое устройство»), СПК, определяет его мореходное качество в расчетном режиме движения.

На основании анализа рассмотренных материалов, авторы пришли к выводу: приоритетным объектом внимания конструкторов СПК в начальной стадии проектирования является не корпус судна, а его ГДК, обеспечивающий успешную реализацию эксклюзивного принципа движения по воде.

Признание объективности этого тезиса будет означать, что формирование теории проектирования СПК надо проводить не на базе «учета особенностей СПК» в рамках классической теории проектирования судов, а как синтез самостоятельной инженерной дисциплины, имеющей специфическую методологию.

### Библиографический список

1. **Ногид Л.М.** Теория проектирования судов / Л.М. Ногид. – Л.: Судпромгиз, 1955.
2. **Панов, А.Ю.** Корабли и суда на подводных крыльях. Основные конструктивные типы отечественных кораблей и судов на подводных крыльях 1915–1955 гг.: монография / А.Ю. Панов; НГТУ им. Р.Е. Алексеева. – Н. Новгород, 2014.
3. **Плисов, Н.Б.** Аэрогидродинамика судов с динамическими принципами поддержания / Н.Б. Плисов К.В., Рождественский, В.К. Трешков. – Л.: Судостроение, 1991.
4. **Блюмин, В.И.** Транспортные суда на подводных крыльях / В.И. Блюмин, Л.А. Иванов, М.Б. Масеев. – М.: Транспорт, 1964.
5. **Иконников, В.В.** Особенности проектирования и конструкции судов на подводных крыльях / В.В. Иконников, А.И. Маскалик. – Л.: Судостроение, 1987.
6. Проектирование самолетов / А.А. Бадягин [и др.]. – М.: Машиностроение, 1972.
7. Справочник авиаконструктора. Т. II. Гидромеханика гидросамолета. – М.: ЦАГИ им. проф. Н.Е. Жуковского, 1938.
8. **Косоуров, К.Ф.** Гидросамолеты их мореходность и расчет / К.Ф. Косоуров. – Л., М.: ОНТИ НКТП СССР. Главная редакция авиационной литературы, 1935.
9. **Мартынов, А.И.** Глиссеры / А.И. Мартынов. – М.: Речиздат, 1940.
10. **Лотов, А.Б.** Исследования ЦАГИ по подводным крыльям // Проблемы движения на подводных крыльях: сб. трудов НТО СП им. акад. А.Н. Крылова. Горький, 1961. Вып. 15. С. 22–42.
11. **Макливи, Р.** Суда на подводных крыльях и воздушной подушке / Р. Макливи. – Л.: Судостроение, 1981.
12. **Зайцев, Н.А.** Отечественные суда на подводных крыльях / Н.А. Зайцев, А.И. Маскалик. – 2-е изд. – Л.: Судостроение, 1964.
13. **Дементьев, В.А.** Определение массы пассажирских СПК // Вопросы судостроения: труды ГИИВТ'а. – Горький, 1972. Вып. 125.
14. **Дементьев, В.А.** Вклад Р.Е. Алексеева в методологию создания скоростных судов // Материалы НТК по проектированию скоростных судов 1986 г., 1988 г. НТО СП, Волжско-камское межобластное правление. – Горький, 1990.
15. **Дементьев, В.А.** Р.Е. Алексеев – основоположник отечественного скоростного судостроения: тез. док. XII НТК по проектированию скоростных судов. ЦКБ по СПК. ВНТО СП, Волжско-камское межобластное правление. – Н. Новгород, 1997.
16. **Царев, Б.А.** Доминантный подход при оптимизации проектных характеристик высокоскоростных судов: тез. док. XII НТК по проектированию скоростных судов. ЦКБ по СПК. ВНТО СП. Волжско-камское межобластное правление. – Н. Новгород, 1997.
17. **Царев, Б.А.** Система алгебраических и дифференциальных уравнений для проектирования СПК // Материалы НТК «Современные технологии в кораблестроительном образовании, науке и производстве». Минобр. РФ, НГТУ, ОАО «Завод «Красное Сормово»: сб. трудов НТО СП. – Н. Новгород, 2002.
18. **Алексеев, Р.Е.** Опыт проектирования, строительства и эксплуатации судов на подводных крыльях и их перспективы развития: сб. трудов НТО им. акад. А.Н. Крылова. – Горький, 1961.

19. **Алексеев, Р.Е.** Опыт эксплуатации теплохода «Ракета» / Р.Е. Алексеев. – Л.: Судостроение, 1958.
20. **Алексеев, Р.Е.** Основные направления развития транспортного скоростного судостроения: докл. на VI НТК по проектированию скоростных судов, посвященный 20-летию с момента создания первого скоростного судна «Ракета». – Горький, 1976.
21. **Алексеев, Р.Е.** Итоги эксплуатации первого речного теплохода на подводных крыльях // Проектирование и строительство речных судов: сб. – М.: Речной транспорт, 1960. С. 15–21.
22. **Ваганов, А.М.** Проектирование скоростных судов / А.М. Ваганов. – Л.: Судостроение, 1978. – 179 с.
23. **Колызаев, Б.А.** Справочник по проектированию с динамическим принципом поддержания / Б.А. Колызаев, А.И. Косоруков, В.А. Литвиненко. – Л.: Судостроение, 1980.
24. **Гартвиг, В.А.** По воде на крыльях / В.А. Гартвиг. – М.: Речной транспорт, 1957.

*Дата поступления  
в редакцию 09.10.2014*

**L.V. ANDRIANOV, M. MUKHINA**

## **THE HYDRODYNAMIC SCHEME OF ARRANGING AS A PRIORITY PROBLEM IN THE DESIGN OF HYDROFOILS**

Nizhny Novgorod state technical university n. a. R.E. Alexeev

**Subject:** Search and analysis of materials in support of the thesis of the priority role of the task of building schemes hydrodynamic layout (flow diagram) hydrofoils in the initial design stage.

**Methodology:** During the formation of the theory of designing of hydrofoils as an engineering discipline must be based on the following provisions, the objective of which is confirmed by the materials of the article:

- priority attention of the designers of the hydrofoils in the initial design stage is not the hull of the vessel and its hydrodynamic complex providing successful implementation of the principle of movement in the water;
- most, it's advisable to not separate, as is customary in the classical theory of ship design, and a comprehensive study of the above the most important "seaworthiness" hydrofoils format one partition, which will appear under the name of, for example, "Mechanics of motion of the hydrofoils".

**Conclusions:**

- when studying problems of acceleration of the vessel on the wings ("propulsion" hydrofoils) and the sustainability of its movement should follow the General approach to the definition of seaworthiness, based on the analysis of the General system of equations or the production of a single experiment;
- development of the latter thesis is formulated in the thesis proposal for classification of the calculation of the longitudinal landing hydrofoils " as the project document, representing not propulsion and resistance movements of hydrofoils.

*Key words:* hydrofoil, the design of hydrofoils, the scheme hydrodynamic layout hydrofoils, testing models.