

# ПРОЕКТНОЕ ОБОСНОВАНИЕ ОПТИМАЛЬНЫХ СОЧЕТАНИЙ ХАРАКТЕРИСТИК МАССЫ, МОЩНОСТИ И СКОРОСТИ ДЛЯ СКОРОСТНЫХ СУДОВ ИЗ КОМПОЗИТОВ МЕТОДАМИ АНАЛИЗА БАЗ ДАННЫХ

Представлен способ проектного обоснования оптимальных сочетаний характеристик массы, мощности судна из композитов. Способ основан на анализе баз данных построенных скоростных судов.



**М.Э. Францев**

*Ключевые слова:* проектирование скоростных судов, композиционные материалы, оптимальные соотношения массы, мощности, скорости

Известно, что цикл проектирования судна имеет спиралевидный характер, когда характеристики судна в процессе разработки проекта неоднократно уточняются и конкретизируются. При этом важно, чтобы определяемые характеристики изначально находились в области оптимальных значений. Современные методы проектирования, базирующиеся на автоматизированных способах обработки информации, в том числе, больших объемов статистических данных, реализуемых современной вычислительной техникой, предоставляют такую возможность. В качестве примера можно привести способ определения потребной мощности главных двигателей судна и его ожидаемых скоростных характеристик с достаточно высокой точностью до проведения модельных испытаний.

Расчет сопротивления движению и определение потребной мощности двигателей является одной из важнейших задач при проектировании судна. На ранних этапах проектирования, когда многие элементы судна еще не определены, используются приближенные способы определения сопротивления судна.

В дальнейшем для этих целей, как правило, используются результаты модельных испытаний. Этот этап существенно увеличивает стоимость проекта судна.

В настоящее время имеется достаточно большое количество результатов модельных испытаний быстроходных судов. С помощью метода Фруда они могут быть пересчитаны на натурное судно. В то же время известно, что практические вычисления по результатам проведенных испытаний в некоторых случаях приводят к принципиальным противоречиям или к существенным искажениям. Поэтому актуален поиск путей, которые бы позволили с достаточной степенью надежности прогнозировать при проектировании ожидаемые скоростные характеристики быстроходных судов, основываясь не только на уже существующих или специально полученных результатах модельных испытаний.

При проектировании современного скоростного судна служебно-разъездного и прогулочного назначения из композиционных материалов вопросы ходкости на определенном этапе могут быть решены не только

**Францев Михаил Эрнстович**, кандидат технических наук, директор АО «Нептун-Судомонтаж». Область научных интересов: проектирование и конструкция скоростных судов из композиционных материалов. Автор более 28 научных работ, в том числе одной монографии. Имеет один патент на изобретение.

за счет использования методов гидродинамики, но, в большой степени, за счет рационального выбора всех элементов судна. [16]

Известно, что обводы корпуса мало влияют на сопротивление воды. Обеспечение высоких ходовых качеств скоростного однокорпусного судна достигается, в первую очередь, правильным выбором его главных размерений, характеристик движительно-рулевого комплекса, оптимальным соотношением его водоизмещения и мощности главных двигателей.

При разработке проекта нового скоростного судна, отличающегося от прототипа рядом характеристик, одним из центральных вопросов проектирования является расчет его ожидаемых скоростных качеств и их сравнение с аналогичными свойствами прототипа.

Потребная мощность для обеспечения скоростных характеристик судна может быть определена по формуле: [16]

$$N = \frac{RV}{A_1 \eta}, \quad (1)$$

где  $N$  — мощность главных двигателей;

$R$  — сопротивление движению судна при заданной скорости;

$V$  — скорость судна;

$\eta$  — пропульсивный коэффициент, представляющий собой коэффициент полезного действия гидродинамического комплекса и валопровода;

$A_1$  — коэффициент учета единообразия размерностей входящих в формулу физических величин.

Как было сказано выше, сопротивление движению судна определяется по результатам модельных испытаний, а на начальных этапах проекта — приближенными методами. Определение величины пропульсивного коэффициента для скоростного судна с ограниченной осадкой вызывает достаточно большие технические трудности, и достоверность его определения неочевидна.

Известно, [2] что водоизмещение судна, мощность его главных двигателей и развиваемая судном скорость при развитом волнообразовании связаны между собой зависимостью вида:

$$N = \frac{D^m V^n}{C_{mn}}. \quad (2)$$

Здесь  $N$  — мощность главных двигателей;

$D$  — водоизмещение судна;

$V$  — скорость судна;

$C_{mn}$  — коэффициент мощности, определяемый по близкому прототипу или путем анализа статистических данных по сходным судам.

Одним из наиболее широко известных вариантов этой зависимости является Адмиралтейская формула:

$$N = \frac{D^{2/3} V^3}{C_a}, \quad (3)$$

где  $C_a$  — адмиралтейский коэффициент.

В [2] указано, что для оценки изменения мощности при изменении скорости отдельного судна (при неизменных его размерах и форме) формула адмиралтейских коэффициентов с постоянным значением  $C_a$  не позволяет получить правильного ответа.

В работе [14] указывается, что адмиралтейский коэффициент представляет собой симплекс ряда трудно учитываемых величин, в том числе, пропульсивного коэффициента. Адмиралтейский коэффициент изменяется в довольно широком интервале и пригоден в качестве использования коэффициента подобия только для очень близкого прототипа при изменении скорости не более чем на 3-4%.

В соответствии с [14] для скоростных судов типа глиссеров зависимость (1) приобретает вид:

$$N = \frac{DV}{C_{\text{скор}}}. \quad (4)$$

Здесь  $C_{\text{скор}}$  — коэффициент.

Адмиралтейский коэффициент и коэффициент  $C_{\text{скор}}$  связаны между собой зависимостью:

$$C_{\text{скор}} = \frac{C_a}{Fru^2 g}, \quad (5)$$

где  $Fru$  — число Фруда по водоизмещению;

$g$  — ускорение свободного падения.

В соответствии с формулой (4) скорость судна - прототипа, его полное водоизмещение и мощность связаны зависимостью вида:

$$\frac{NC_{\text{скор}}}{D} = V. \quad (6)$$

Предположим, что на судно с характеристиками  $D$ ,  $N$ ,  $V$  устанавливается новый двигатель другой мощности, измененной на  $\Delta N$ , но очень близкий по собственной массе ранее установленному двигателю. Такая установка не вызовет существенного изменения полного водоизмещения. Формула определения скорости измененного прототипа при фиксированном водоизмещении будут выглядеть так:

$$\frac{(N + \Delta N)C_{\text{скор}_1}}{D} = V + \Delta V. \quad (7)$$

Формула определения прироста скорости в зависимости от прироста мощности при фиксированном водоизмещении будет иметь вид:

«ПРОЕКТНОЕ ОБОСНОВАНИЕ ОПТИМАЛЬНЫХ СОЧЕТАНИЙ ХАРАКТЕРИСТИК  
МАССЫ, МОЩНОСТИ И СКОРОСТИ ДЛЯ СКОРОСТНЫХ СУДОВ ИЗ КОМПОЗИТОВ  
МЕТОДАМИ АНАЛИЗА БАЗ ДАННЫХ»

$$\frac{(C_{\text{скор}_1} - C_{\text{скор}})N + \Delta N C_{\text{скор}_1}}{D} = \Delta V. \quad (8)$$

Установка на это судно ряда двигателей различной мощности, но сопоставимой массы, не вызывающей существенного изменения водоизмещения судна, или просто изменение мощности установленного двигателя, путем изменения его подачи топлива, но сопровождающаяся изменением скорости судна, формирует множество значений:  $C_{\text{скор}_0}, C_{\text{скор}_1}, C_{\text{скор}_2} \dots \dots C_{\text{скор}_n}$ , то есть  $C_{\text{скор}} = f(N)$

Аналогично, многократное изменение полного водоизмещения этого судна, например, за счет изменения полезной нагрузки, без изменения мощности главного двигателя вызовет ряд изменений скорости судна и сформирует новое множество значений, то есть,  $C_{\text{скор}} = \varphi(D)$ .

Установка на это же судно с двигателем неизменной мощности и постоянным водоизмещением различных гребных винтов с разным шаговым и дисковым отношением, вызвавшая изменение скорости, сформирует еще одно множество значений, то есть  $C_{\text{скор}} = u(V)$ .

Из формулы (6) коэффициент  $C_{\text{скор}}$  может быть выражен как:

$$\frac{VD}{N} = C_{\text{скор}}. \quad (9)$$

Таким образом, коэффициент  $C_{\text{скор}}$  является функцией трех характеристик судна  $D, N, V$  в виде  $C_{\text{скор}} = \tau(D, N, V)$ . С точки зрения математики, график такой функции в координатных осях  $D, N, V$  описывается областью, все точки которой удовлетворяют указанному условию [10]. Уравнения, описывающие данную область, определяют аналитическую зависимость между характеристиками судна  $D, N, V$ .

Так как уравнения (3)-(5) являются частными случаями уравнения (2), можно утверждать, что коэффициент  $C_{mn}$  является функцией полной массы, скорости и мощности судна  $D, N, V$  в виде  $C_{mn} = \psi(D, N, V)$  устанавливающей зависимости между этими характеристиками. Точный вид этой зависимости неизвестен, однако накоплено достаточное число экспериментальных данных (характеристик построенных судов).

Для идентификации этой зависимости в целях практического применения необходимо определенным образом сгруппировать и обработать экспериментальные данные по построенным и эксплуатирующимся судам. Современные математические методы, базирующиеся на автоматизированных способах обработки информации, в том числе, больших объемов баз данных, реализуемых современной вычислительной техникой, предоставляют такую возможность. Для обработки множества значений, сформированного на базе экспериментальных дан-

ных, необходимо перейти от функции трех переменных к более простым функциям.

В работе Колмогорова А.Н. [7] доказал, что всякая непрерывная функция  $n$  ( $n > 3$ ) переменных представима в виде суперпозиции непрерывных функций трех переменных. Арнольд В.И. показал [1], что всякая непрерывная функция трех переменных представима в виде суперпозиций непрерывных функций двух переменных:

$$f(x, y, z) = \sum_{i=0}^9 f_i(\varphi_i(x, y)z), \quad (10)$$

где все функции непрерывны. В работе Колмогоров А.Н. показал [8], что каждая непрерывная функция  $n$  переменных, заданная на единичном кубе  $n$ -мерного пространства, представима с помощью операций сложения, умножения и суперпозиции из непрерывных функций одного переменного. В частности, каждая непрерывная функция двух переменных представима в виде

$$f(x, y) = \sum_{q=1}^5 h_q[\varphi_q(x) + \psi_q(y)]. \quad (11)$$

Теорема Вейерштрасса об аппроксимации утверждает, что непрерывную функцию нескольких переменных на замкнутом ограниченном множестве можно равномерно приблизить последовательностью полиномов. Теорема Стоуна дает рецепт конструирования конкретных обобщений теоремы Вейерштрасса для компактного пространства и множества непрерывных функций заданного на компактном пространстве с вещественными значениями. Опираясь на аппроксимационную теорему Вейерштрасса и теорему Стоуна решаются задачи по приближению функций многих переменных с помощью линейных операций и суперпозиций функций одного переменного.

В работах [9; 11] доказана возможность аппроксимации функции многих переменных с любой степенью точности суперпозициями и линейными комбинациями функций одной переменной.

Рассматриваемая задача относится к категории задач по оценке и аппроксимации по нескольким точкам функций вход-выход для решения в дальнейшем задачи прогноза неизвестных значений выходов по известным входам.

В качестве одного из способов определения этой функции может быть использована статистическая обработка и анализ баз данных существующих катеров и малых судов из композиционных материалов служебно-разъездного назначения, содержащих большое количество характеристик  $D, N, V$  с использованием методов статистического анализа.

Одним из наиболее мощных аналитических методов исследования является разделение («разбиение») базы данных на группы для сравнения структуры получившихся подмножеств. Эти методы широко применяются, как в разведочном анализе данных, так и при проверке гипотез, и известны под разными названиями (классификация, группировка, категоризация, разбиение, расслоение и пр.)

Для количественного описания различий между группами наблюдений разработаны многочисленные вычислительные методы, основанные на группировке данных. Это, например, дисперсионный анализ. Однако графические средства, например, категоризованные графики дают особые преимущества и позволяют выявить закономерности, которые трудно поддаются количественному описанию, такие, как сложные взаимосвязи, исключения или аномалии, и которые весьма сложно обнаружить с помощью вычислительных процедур. В этих случаях графические методы предоставляют уникальные возможности многомерного аналитического исследования данных. [3]

Известно, что для глиссирующих судов значения функции  $C_{\text{скор}}$  достаточно стабильны [14], что может затруднить ее точное выявление методами анализа баз данных.

Значения адмиралтейского коэффициента  $C_a$  изменяются в более широких пределах, и динамика его изменения имеет более отчетливый характер, чем динамика изменения  $C_{\text{скор}}$ . Интересующая нас функция  $C_{\text{скор}}$  и соответствующие ей значения адмирал-

тейского коэффициента  $C_a$  связаны соотношением (5). Изучение динамики изменения  $C_a$  при фиксации различных параметров может позволить получить достоверные значения этого коэффициента, а, следовательно, и  $C_{\text{скор}}$ , для определения значений характеристик скоростного судна  $D, N, V$  в условиях развитого волнообразования.

Объектами анализа являются 274 скоростных судна служебно-разъездного и прогулочного назначения, имеющие корпуса из неметаллических композиционных материалов, производства США, стран Европы и Азии. Обводы этих судов являются острокульми, с достаточно большими углами килеватости и продольными реданами. В качестве движителей применены гребные винты с большим дисковым отношением. На судах малых размеров (длиной до 10-11 м) используются поворотно-откидные колонки. На некоторых, наиболее скоростных судах установлены приводы Арнесона. Суда, являющиеся объектом анализа, имеют водоизмещение от 2 до 160 т, длину от 9 до 42 м, установленную мощность главных двигателей от 200 до 8000 кВт, скорость полного хода от 10 м/с (19 узлов) до 45 м/с (87 узлов). Исходные данные по проектам этих судов были взяты из специализированных справочно-информационных изданий [4; 5; 12], а также информационных ресурсов Интернет.

Вся совокупность объектов анализа группировалась в зависимости от их архитектурно-компоновочных особенностей, главных размерений и скоростных режимов эксплуатации. Все суда включены в расчет-

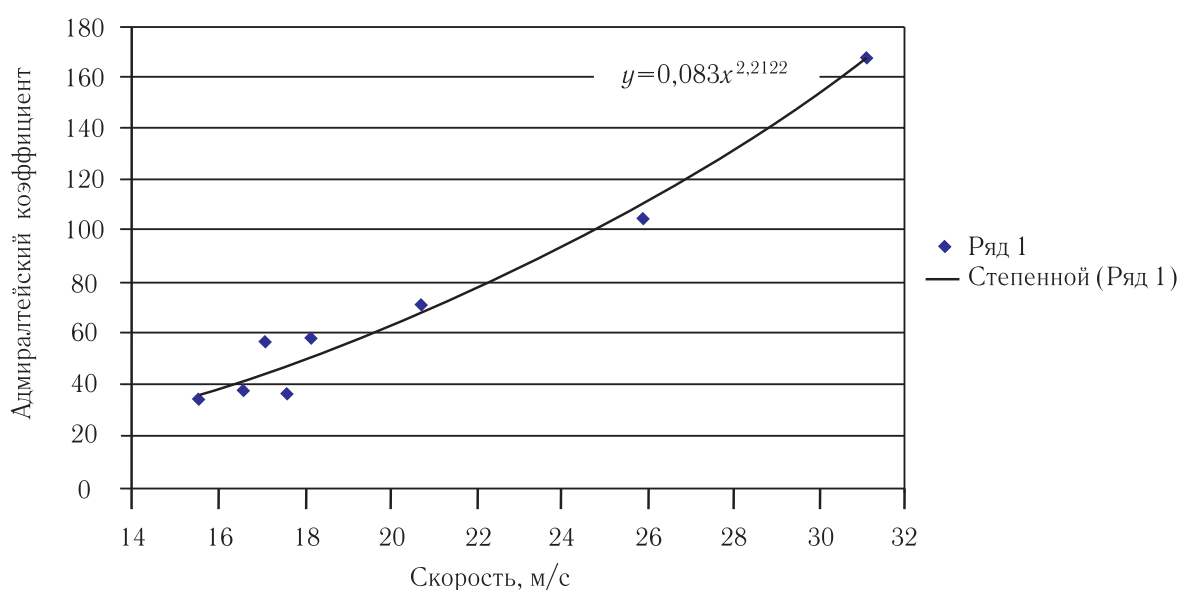


Рис. 2. Динамика изменения адмиралтейского коэффициента в зависимости от скорости для глиссеров полной массой 6 т

ные группы по девяти интервалам водоизмещения  $D$ , пяти интервалам длины корпуса  $L$  и четырем интервалам скорости  $V$ . По всем этим интервалам были произведены расчеты характеристик и построены диаграммы зависимостей.

При расчете характеристик и получении зависимостей их изменений в ряде случаев производилась фиксация определенных параметров. В результате дополнительно были рассмотрены расчетные случаи и построены различные диаграммы зависимостей для 28 значений водоизмещения  $D$  и 26 значений числа Фруда по водоизмещению  $Fru$ .

Произведены расчеты и построены диаграммы изменения коэффициента полноты водоизмещения  $\delta$  в зависимости от полного водоизмещения  $D$  по заданным интервалам водоизмещения, а также изменения мощности главных двигателей  $N$  в зависимости от полного водоизмещения  $D$  при фиксированных значениях числа Фруда по водоизмещению  $Fru$ .

Рассмотрены вопросы зависимости энерговооруженности  $N/D$  судов от их полного водоизмещения и построены диаграммы ее изменения в различных диапазонах изменения скорости и при фиксированных значениях  $Fru$ .

Исследовано изменение скоростных характеристик судов  $V$ ,  $Fru$ ,  $Frl$  в зависимости от их энерговооруженности  $N/D$  и мощности главных двигателей  $N$  и построены диаграммы их изменения для различных интервалов длины корпуса и фиксированных значений водоизмещения.

Произведены расчеты и построены диаграммы изменения адмиралтейского коэффициента  $C_a$  в зависимости от скоростных характеристик  $V$ ,  $Fru$  и энерговооруженности  $N/D$  как для заданных интервалов изменения водоизмещения  $D$ , так и его фиксированных значений.

Выполнены аналогичные расчеты и построены диаграммы изменения скоростного коэффициента для глиссеров  $C_{\text{скор}}$ .

Применяемая для обработки данных компьютерная программа Microsoft Excel позволяет использовать для аппроксимации линейную, степенную, логарифмическую, экспоненциальную и другие виды функций. В произведенных расчетах для аппроксимации использовались полиномы.

Полученное семейство диаграмм в сочетании с описывающими их уравнениями образует устойчивые взаимосвязи между такими характеристиками скоростных судов из композиционных материалов, как водоизмещение  $D$ , мощность главных двигателей  $N$ , энерговооруженность  $N/D$ , а также их скоростными характеристиками: скоростью  $V$  и числом Фруда по водоизмещению  $Fru$ . Сопоставление величин этих характеристик, полученных при расчетах с использованием различных зависимостей, в основном, дает отклонение около 2-5%.

Для оценки работоспособности полученных значений коэффициентов был произведен проверочный расчет потребной мощности при заданной скорости для существующих скоростных глиссирующих судов,

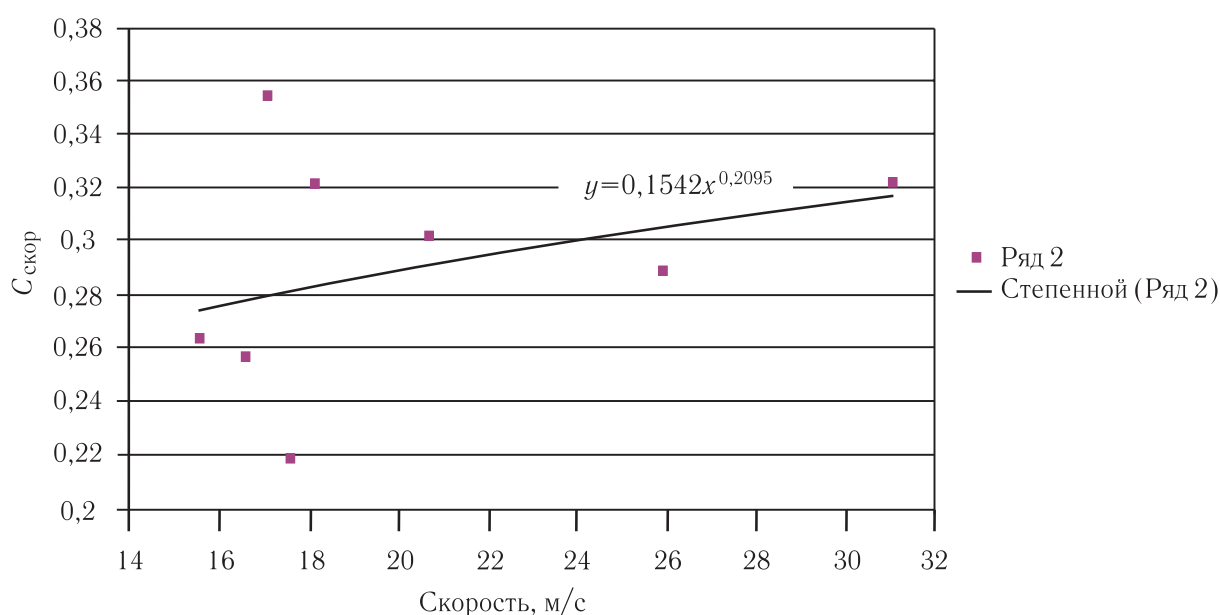


Рис. 3. Динамика изменения коэффициента  $C_{\text{скор}}$  в зависимости от скорости для глиссеров полной массой 6 т

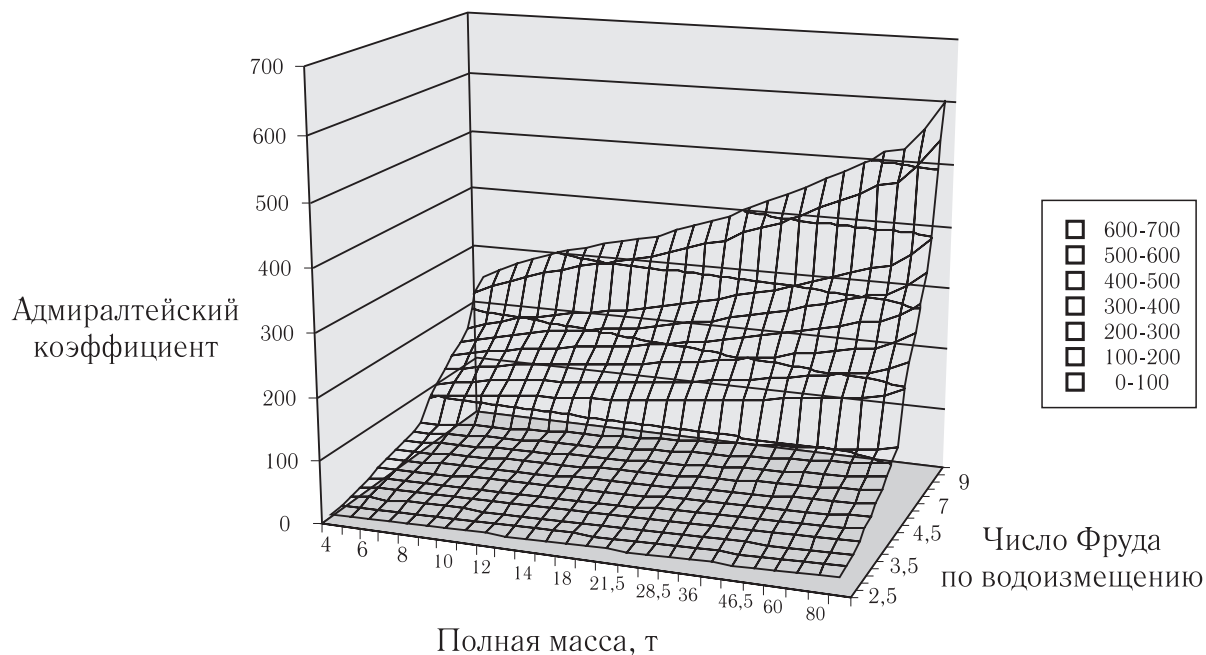


Рис. 4. Изменение адмиралтейского коэффициента в зависимости от полной массы и числа Фруда по водоизмещению для глиссеров

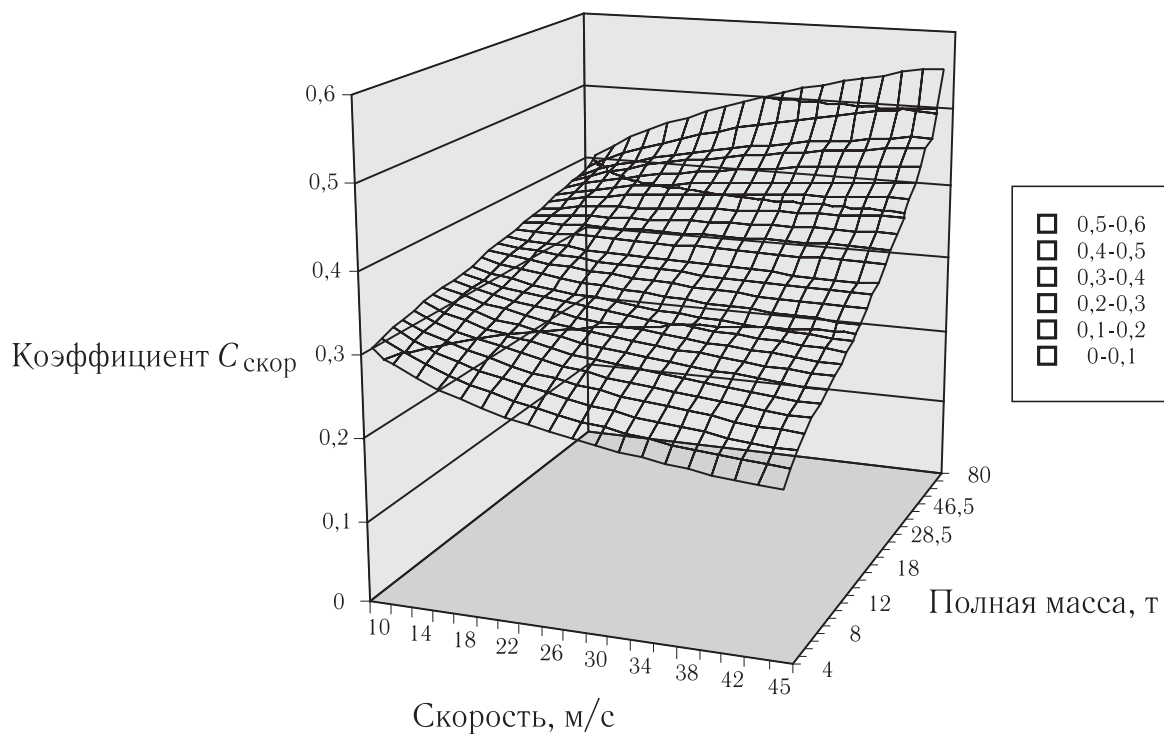


Рис. 5. Изменение коэффициента  $C_{\text{скор}}$  в зависимости от полной массы и числа Фруда по водоизмещению для глиссеров


следующих проектов:

- скоростное судно «Терьер» пр. 14170, автор проекта ОАО «Зеленодольское ПКБ»;
- скоростное судно «Ястреб» пр. 12260 автор проекта ЦМКБ «Алмаз»;
- скоростное судно «Мангуст» пр. 12150 автор проекта ЦМКБ «Алмаз»;
- скоростное судно «Соболь» пр. 12200 автор проекта ЦМКБ «Алмаз».

Проектные характеристики выше перечисленных судов были взяты из открытых источников.

В результате выполненного расчета установлено, что для получения значений мощности близких к проектным значениям можно использовать, как адмиралтейский коэффициент  $C_a$ , так и коэффициент  $C_{\text{скор}}$ . Погрешность отклонения полученных величин мощности от проектных значений при этом находится в пределах 2,7-5,2%.

Можно предположить, что полученное семейство диаграмм в сочетании с описывающими их уравнениями определяет область оптимальных сочетаний характеристик  $D, N, N/D, V, Frv$  судов служебно-разъездного и прогулочного назначения с корпусами, изготовленными из композиционных материалов, имеющих острооскулые обводы и эксплуатирующихся в зоне развитого волнообразования.

Предложенный метод определения соотношений перечисленных характеристик не является альтернативным традиционным методам проектирования, а только дополняет их. Он позволяет проектировщику достаточно быстро осуществлять поиск оптимальных соотношений указанных характеристик при новом проектировании и придерживаться ее при переходе от характеристик прототипа к характеристикам нового проекта. 

## Литература

1. Арнольд В. И. О функциях трех переменных // Доклады АН СССР. 1957. Т. 114, N 4. —С. 679-681.
2. Ашик В. В. Проектирование судов. —Л.: Судостроение, 1985. —486 с.
3. Боровков А. А. Математическая статистика. —М.: Физматлит, 2007. —704 с.
4. Капитан-Клуб, 1996-2004.
5. Катера и яхты, 1969 — 2004.
6. Колмогоров А. Н. Избранные труды. Математика и механика. —М.: Наука, 1985. 470 с.
7. Колмогоров А. Н. О представлении непрерывных функций нескольких переменных суперпозициями функций меньшего числа переменных // Доклады АН СССР. 1956. Т.108. —С.179-182.
8. Колмогоров А. Н. О представлении непрерывных функций нескольких переменных в виде суперпозиций непрерывных функций одного переменного и сложения // Доклады АН СССР. 1957. Т.114. —С.953-956.
9. Коробов Н. М. Теоретико-численные методы в приближенном анализе. —М.: Физматгиз, 1984. — 222 с.
10. Кудрявцев Л. Д. Курс математического анализа. Том 1., —М.: Высшая школа, 1981. —688 с.
11. Лоран П. - Ж. Аппроксимация и оптимизация. —М.: Мир, 1975. —498 с.
12. Современные катера и яхты 2004/2005. —М.: Премьера, 2004, —478 с.
13. Сухарев А. Г. Минимаксные алгоритмы в задачах численного анализа. —М.: Наука, 1989. —304 с.
14. Царев Б. А. Исследование проектного уравнения мощности В.Л. Позднина и его современных интерпретаций// Материалы Междунар. науч. конф. «Леонард Эйлер и современная наука», —СПб.: 2007. —С. 423-428
15. Царев Б. А. Модульные задачи в проектировании судов. —Л.: ЛКИ, 1978. —96 с.
16. Царев Б. А. Оптимизационное проектирование скоростных судов. —Л.: ЛКИ, 1988. —102 с.