

УДК 656.62; 629.122

DOI: 10.37890/jwt.vi87.710

Обзор методов расчёта сопротивления воды движению судов на мелководье

А.Ю. Платов¹

ORCID: 0000-0002-4589-0348

А.С. Прокопенко²

ORCID: 0009-0004-1722-71374

¹*Нижегородский архитектурно-строительный университет, г. Н. Новгород, Россия*

²*Волжский государственный университет водного транспорта, г. Нижний Новгород, Россия*

Аннотация. Расчёт сопротивления судна при движении на мелководье требуется при решении самых разных прикладных задач. Побуждением для написания данного обзора является разработка имитационной модели работы речного флота, для которой существенное значение имеет задача определения ходового времени рейса судна-состава. С начала 20-го века был создан ряд методов для учёта влияния мелководья на сопротивление воды при движении водоизмещающих судов, использующих разные подходы. Методы, созданные зарубежными исследователями в последние двадцать лет, не получили освещения в отечественной литературе. При этом в зарубежной литературе почти неизвестны отечественные разработки. Поэтому представляет интерес сопоставление всех сколько-нибудь значимых для практики методов. В статье рассмотрено 16 основных методов, причём показано, что все эти методы можно привести к единой форме пересчёта. Описание методов сгруппировано по трём периодам: период до 60-х годов 20-го века, период второй половины 20-го века и период 21-го века. При этом для передовых методов каждого периода можно выделить ведущий методический принцип построения: на основе полуэмпирических идей, на основе численного и аналитического моделирования двумерного обтекания и на основе конечно-разностного моделирования трёхмерного обтекания.

Ключевые слова: сопротивление судна, сопротивление на мелкой воде, мелководье, метод Шлихтинга, метод Карпова, метод Рейвена, поток вытеснения, коэффициент сопротивления трения, коэффициент формы, коэффициент волнового сопротивления.

The overview of methods for ship's resistance in shallow water

Alexander J. Platov¹

ORCID: 0000-0002-4589-0348

Andrej S. Prokopenko²

ORCID: 0009-0004-1722-71374

¹*Nizhny Novgorod State University of Architecture and Civil Engineering, Nizhny Novgorod, Russia*

²*Volga State University of Water Transport, Nizhny Novgorod, Russia*

Abstract. The calculation of ship's resistance in shallow water is required for solving a wide variety of applied problems. The motivation for this review is to develop a simulation model of the operation of the river fleet, for which the task of determining the moving time of a ship or convoy is essential. Since the beginning of the 20th century, a number of methods have been developed and different approaches have been used. The methods created by foreign researchers during the last twenty years have not received coverage in the domestic literature. At the same time, domestic development results are almost unknown in foreign literature. Therefore, it is of interest to compare all the methods that are of any significance for practice. The article discusses 16 main methods, and shows that all these methods can be reduced to a single form of calculation. The methods are grouped into three periods: the period up to the

60s of the 20th century, the period of the second half of the 20th century and the period of the 21st century. At the same time, for the advanced methods of each period, we can distinguish the leading methodological principle of construction: based on semi-empirical ideas, based on numerical and analytical modeling of two-dimensional flow, and based on finite-difference modeling of three-dimensional flow.

Keywords: ship resistance, shallow water resistance, shallow water, Schlichting method, Karpov method, Raven method, displacement flow, coefficient of friction resistance, coefficient of shape, coefficient of wave resistance.

Введение

Необходимость в вычислении сопротивления воды движению судна возникает при решении задач эксплуатационного обоснования судов, проектирования судов, а также при решении задач рейсового планирования работа речного флота. Другое, пока менее распространённая задача – построение имитационных моделей работы флота для текущего планирования работы флота, а также для моделирования в составе управленческих тренажёров. В подобных задачах востребованы упрощённые, инженерные методы расчёта сопротивления. Поэтому развитие таких методов является актуальной задачей.

Для вычисления сопротивления судов внутреннего плавания особую актуальность имеют методы расчёта сопротивления воды на мелководье. Ограниченность экспериментального материала, а также сложность гидродинамических явлений до сих пор не позволяет уверенно определить предпочтительный способ расчёта такого сопротивления.

Согласно рекомендациям конференции опытов бассейнов (ИТТС) влияние мелководья начинается при условиях $Fh = \sqrt{gh} > 0,5$ или при $h_T = h/T < 0,4$, где h – глубина водного пути, T – осадка судна, g – ускорение свободного падения [1]. Мелководье влияет не только на сопротивление судна, но и на работу движителей. Кроме того, для многих рек и даже водохранилищ с относительно большой шириной зеркала воды ширина фарватера небольшая и потому судно при движении испытывает также и влияние стеснённости водного пути. Совместное влияние всех этих факторов не позволяет разделить в натуральных экспериментах поведение корпуса и движителей. Модельные же эксперименты при этом могут противоречить натурным. Состояние конечно-разностных методов так же пока не всегда позволяет получать удовлетворительную количественную картину явлений. Поэтому задача уточнения влияния мелководья остаётся до сих пор нерешённой.

В последнее время благодаря применению конечно-разностного моделирования были сформулированы новые идеи по построению расчёта влияния мелководья, а также появился ряд новых методов. Однако практические преимущества новых методов по сравнению со старыми не установлены.

Общий принцип вычисления сопротивления на мелководье

Как правило, существующие инженерные методы расчёта сопротивления на мелководье основаны на пересчёте величины сопротивления для глубокой воды, причём пересчёту подвергается либо общее сопротивление R_T , либо одна или несколько её компонент:

$$R_T = R_F + R_{VP} + R_W = R_V + R_W = R_F + R_R,$$

где под R_F , R_{VP} , R_W , R_V и R_R обозначены сопротивления трения, формы, а также волновое, вязкостное и остаточное соответственно.

Пересчёт может осуществляться тремя способами. Во-первых, может пересчитываться коэффициент сопротивления у некоторой компоненты сопротивления, что приводит к замене выражения R на выражение типа $R_h = kR$. Во-вторых, может пересчитываться скорость, то есть выражение $R(v)$ меняется на

выражение типа $R_h(v) = R(v_h)$, где v - заданная скорость судна на мелкой воде, v_h - пересчитанная скорость судна. Третий тип корректировки сочетает первые два.

Все существующие методы можно свести к указанным способам, поэтому общая формула пересчёта может быть записана в виде:

$$R_T(v) = k_1 R_F(v_1) + k_2 R_{VP}(v_2) + k_3 R_W(v_3),$$

где k_i – коэффициенты пересчёта соответствующих компонент сопротивления, а v_i – пересчитанные расчётные скорости.

Принципы, лежащие в основе получения коэффициентов и расчётных скоростей, различные. Кроме того, не все методы пересчёта непосредственно применимы для конкретных методов расчёта сопротивления. Например, для метода расчёта сопротивления, в котором рассчитывается только остаточное сопротивление, нельзя использовать пересчёт с отдельным коэффициентом k_2 .

Методы пересчёта первой половины 20-го века

Судя по [2], первым практически ориентированным методом расчёта сопротивления на мелкой воде был, разработанный, видимо, в 1926 г. метод Геберса (Fr. Gebers). Он основан на корректировке метода того же автора для глубокой воды и сводится к изменению коэффициента сопротивления трения:

$$R_h = (fS_6 + f_d S_d + \varphi A_M) v^{2,25},$$

где f – коэффициент сопротивления трения корпуса на глубокой воде, f_d – коэффициент сопротивления трения корпуса на мелкой воде, φ – коэффициент остаточного сопротивления, S_6 – площадь смоченной поверхности бортов, S_d – площадь смоченной поверхности днища, A_M – площадь сечения мидель-шпангоута. Коэффициент f_d при этом рассчитывается в зависимости от расстояния от днища судна до дна водоёма.

Как можно видеть, в методе Геберса используется идея увеличения коэффициента трения из-за изменения пограничного слоя между днищем судна и дном водоёма, однако такое изменение было дано не в критериальной форме и потому не может быть использовано вне тех условий, которые изучал Ф. Геберс.

Несмотря на свою архаичность, метод цитируется в зарубежной литературе, в частности, в современной [3]. В отечественной литературе метод Геберса без упоминания автора приведён также в [4].

Большую известность имеет метод О. Шлихтинга (O. Schlichting), разработанный в 1932 г. [5]. В методе Шлихтинга были предложены две идеи, которые до сих пор воспроизводятся в большом числе публикаций.

Первая идея состоит в том, что сопротивление трения увеличивается из-за уменьшения гидравлического сечения потока, что приводит к росту локальной скорости обтекания. Иначе говоря, сопротивление трения должно рассчитываться при скорости

$$v_1 = v + \Delta v,$$

где Δv – величина так называемого потока вытеснения. Для определения потока вытеснения на основе модельных испытаний О. Шлихтингом была построена эмпирическая кривая в зависимости от отношения $\sqrt{A_M}/h$, которая приведена в левой части рис. 1.

Вторая идея состоит в том, что волновое сопротивление на мелкой воде равно волновому сопротивлению на глубокой воде, если длины поперечных волн, порождаемых при движении судна, одинаковы. То есть сопротивление на мелкой воде при скорости v будет равно сопротивлению на глубокой воде, но при скорости v_h

$$v_2 = v + \Delta v + \Delta c,$$

где Δc – снижение скорости волн на мелкой воде.

Таким образом, метод Шлихтинга соответствует формуле:

$$R_h(v) = R_F(v_1) + R_R(v_2).$$

Снижение скорости волн вычисляется на основании известных соотношений из линейной теории поверхностных волн. С помощью специально написанной программы был получен график в том же виде, что и предложенный О. Шлихтингом, который приведён в правой части рис. 1.

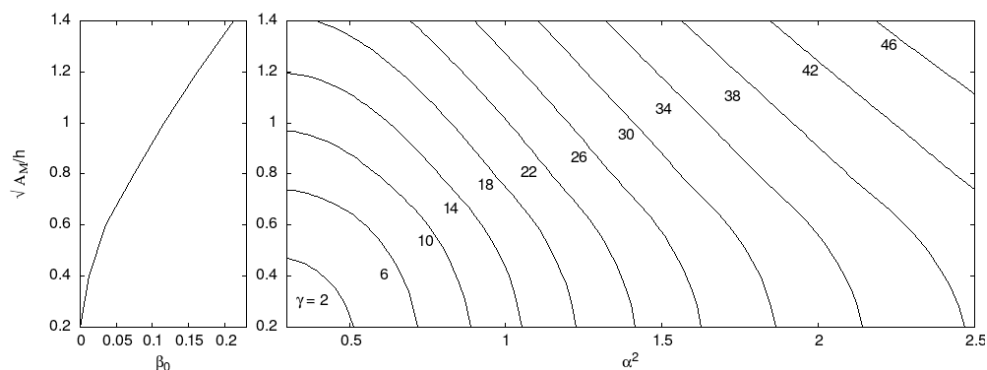


Рис. 1. Графики поправок в методе О. Шлихтинга.
 Обозначено: $\alpha = v_h/\sqrt{gh}$, $\beta_0 = \Delta v/v$, $\gamma = (\Delta c + \Delta v)/v_h$

Метод основан на испытаниях всего трёх моделей судов специфических обводов (два лёгких и один тяжёлый крейсера), однако специфика судов должна проявляться только в вязкостной компоненте сопротивления. В [5] отмечается, что в методе Шлихтинга пренебрегается тем, что высота волны в трёхмерном случае ведёт себя независимо от длины волны, а потому второе допущение Шлихтинга является очень сильным упрощением.

Развитием идеи Шлихтинга был предложенный в 1938 г. на основе испытаний быстроходных судов метод И.В. Гирса [6]. Пересчёт скоростей в этом методе осуществляется аналогично методу Шлихтинга, но поправки вычисляются по другим эмпирическим графикам, которые приведены на рис. 2.

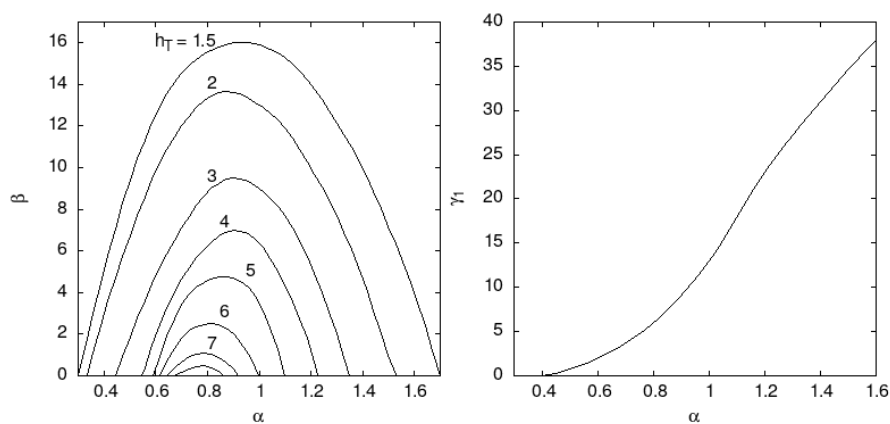


Рис. 2. Графики поправок в методе Гирса
 Обозначено: $\alpha = v_h/\sqrt{gh}$, $\beta = \Delta v/v_h$ и $\gamma_1 = 1 - \sqrt{th 1/\alpha^2}$

Позднее графики рис. 2 были продолжены в область сверхкритических скоростей и Ю.В. Афанасьевым, поэтому чаще всего употребляется название метод Гирса-Афанасьева. Упомянутые графики можно найти в [4]. Можно заметить, что именно в области сверхкритических скоростей отмечалась низкая точность данного метода [7].

В 1945 г. был разработан известный метод А.Б. Карпова [8], также развивающий подход Шлихтинга. Метод излагается в литературе в двух вариантах. В первом варианте МК [8; 9; 10] представляет собой набор графиков функций α и β в виде изолиний в плоскости $Fh - h_T$. Как было установлено нами (это потребовало разработать нетривиальную программу), эти графики в области скоростей $Fh \leq 1,0$ представляют собой просто пересчёт функций метода Гирса в новых координатах. Рассчитанные с помощью метода Гирса графики приведены на рис. 3 и можно убедиться, что они совпадают с графиками метода Карпова, приведёнными в [8; 9; 10]. Заметим, что дополнительно к МГА А.Б. Карповым рассчитаны графики для сверхкритической области, построенные им по опытным данным, которые на рис. 3 не приводятся.

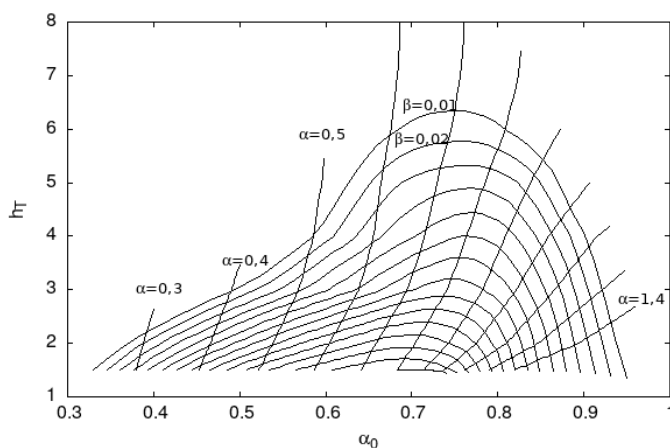


Рис. 3. Графики функций $\alpha_0 = v/\sqrt{gh}$ $\alpha = v_h/\sqrt{gh}$ и $\beta = \Delta v/v_h$ метода А.Б. Карпова, рассчитанные с помощью метода Гирса

Во втором варианте метода Карпова, приведённом впервые в [11] (соответствующий раздел в книге [11] написан А.В. Карповым) графики (см. рис 4) позволяют непосредственно корректировать скорости для сопротивления трения и остаточного сопротивления. Однако и для этого варианта также можно установить, что он в докритической области является во многом производным от метода Гирса.

Второй вариант метода Карпова, вероятно, имеет наибольшую известность в отечественной литературе и один из всего двух, судя по обзорам [12; 13;14], отечественных методов, известных в литературе зарубежной (второй метод – это метод Апухтина, разработанный для скоростных судов и потому здесь не рассматриваемый).

Можно заметить, что в методах Карпова и Гирса сопротивление трения зависит от числа Фруда по глубине Fh , что не соответствует физике явлений.

Метод В.В. Звонкова (1956) [9] основан на вычислении роста местного потока скоростей. То есть принципиально метод основан на выражении.

$$R_h(v) = R_F(v_0) + R_R(v_0),$$

где $v_0 = v + \Delta v$ – скорость обтекания сжатым потоком непосредственно у его смоченной поверхности.

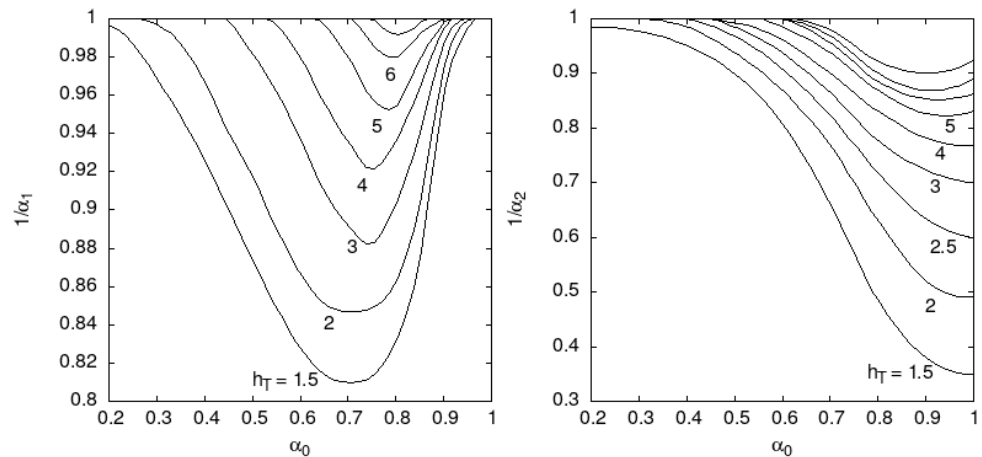


Рис. 4. Графики функций метода А.Б. Карпова,
 $\alpha_0 = v/\sqrt{gh}$, $\alpha_1 = v/(v + \Delta v)$, $\alpha_2 = v/(v + \Delta v + \Delta c)$

Относительное приращение потока, равное $v_0/v = (v + \Delta v)/v$ задано набором графиков, зависящих от h_T и F_h (рис. 5).

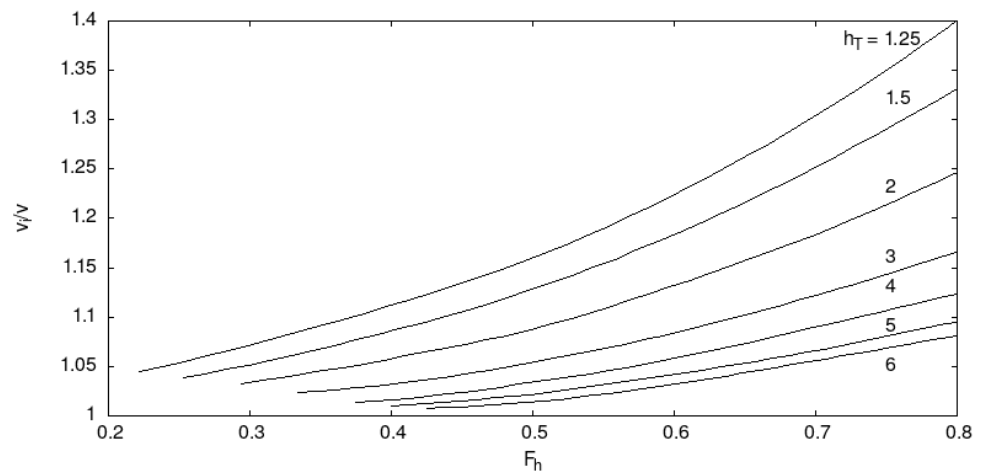


Рис. 5. Относительное увеличение скорости обтекания в методе В.В. Звонкова

В отличие от методов на базе идеи Шлихтинга, волновое сопротивление в методе Звонкова не корректируется. Это соответствует тому, что при умеренных значениях числа F_h волновое сопротивление изменяется мало. Как отмечает сам автор метода, графики построены на недостаточном числе опытных данных.

Методы пересчёта второй половины 20-го века

В этот период кроме чисто эмпирических и полуэмпирических подходов для создания методов пересчёта сопротивления на мелководье стали привлекаться результаты численного моделирования двумерных потоков, а также аналитические решения схематических моделей обтекания. Это позволило углубить понимание гидродинамики на мелкой воде, а также предложить принципиально новые методы пересчёта.

В 1963-1968 гг. на основе модельных испытаний в ГИИВТе, ЛИВТе и НИИВТе С.Н. Рудиным с участием Ю.Н. Кузьменко, А.М. Полунина и В.Г. Павленко был разработан новый метод, который основан на формуле [15]:

$$R_h(v) = k_F R_F(v) + k_V R_V(v) + k_W R_W(v),$$

где k_F – коэффициент пересчёта сопротивления трения (а также и формы), k_W – коэффициент увеличения волнового сопротивления, определяемые по выражениям

$$k_F = \left(1 - \frac{\sqrt{\delta}}{h_T}\right)^{0,58} \frac{1 - 0,5(\sqrt{\delta} + 0,75)/h_T}{1 - 0,75/h_T}, \quad k_W = \left(1 - \frac{1}{h_T}\right)^{-(0,1 + 1,65/h_T)}.$$

где δ – коэффициент полноты водоизмещения.

Первый коэффициент определён на основе решения плоской задачи вязкого течения между двумя пластинами, в которой учёт трёхмерности осуществлялся за счёт коэффициента растекания, равного отношению расхода жидкости под днищем на мелкой воде к такому же расходу на глубокой воде. Коэффициент растекания выведен на основе расчётов потенциального обтекания трёхосных эллипсоидов в ограниченном потоке.

Коэффициент пересчёта волнового сопротивления был выведен на основании модельных испытаний, чем утверждалось, что волновое сопротивление на мелкой и глубокой воде пропорциональны.

Позже был опубликован другой вариант данного метода, в котором вместо корректировки коэффициента сопротивления трения использовался единый множитель для всего вязкостного сопротивления

$$k_V = \left(1 - \frac{1}{h_T}\right)^{-0,62(1 - 0,1/h_T)},$$

поэтому метод выражался формулой

$$R_h(v) = k_V R_V(v) + k_W R_W(v).$$

Другой метод, разработанный Е.М. Сироткиным в НИИВТ в конце 80-х, выражается формулой [16]:

$$R_h(v) = R_F(v)k_F + R_R(v)k_W,$$

где $k_F = \left(1 - \frac{1}{h_T}\right)^b$, $b = (6,63 + 0,884L_B) \frac{\lg Re}{\lg Re - 3,35} B_T 10^{-3}$, $v_W = k_W v$,

$$k_W = \left\{ 1 - \frac{0,618}{h_T^{1,644} [2,06 - 11,6(\delta - 0,4)^3]^{0,333}} \left\{ 1 + \left[0,314 + \frac{3,59}{h_T} - \frac{5,5}{h_T^2} \right] \ln \frac{B_T}{6} \right\} \right\}^{-1}.$$

В основе расчёта остаточного сопротивления используется гипотеза О.Шлихтинга, которая использовалась для обработки данных модельных испытаний, а для расчёта сопротивления трения применяется корректировка коэффициента трения, которая выведена С.Н. Коротковым с помощью двумерных разностных моделей течений жидкости в ограниченном потоке в ряде статей в трудах НИИВТ в 1979-1988 гг.

В 1982 г. на основе систематических испытаний моделей судов с разными обводами Е.Ф. Сахно были разработаны диаграммы, с помощью которых пересчитывается коэффициент остаточного сопротивления [17]. Коэффициент трения при этом остаётся неизменным.

Кроме описанных методов в отечественной литературе данного периода [18] приводились также сугубо эмпирические регрессии, с помощью одного коэффициента корректирующие коэффициент общего сопротивления, то есть выражаемые формулой:

$$R_h(v) = k_T R(v).$$

К этим методам относятся метод К.Н. Шимко, в котором $k_T = 1 + 5,5 F_h^2/h_T^2$, а также метод В.А. Лесюкова, для которого $k_T = 1 + 1,5/h_T^2$.

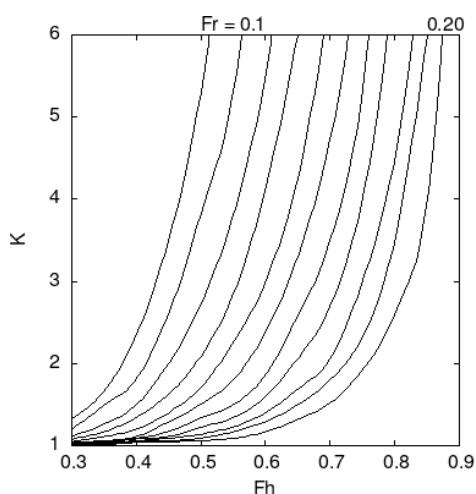


Рис. 6. Коэффициент пересчёта $K = R_{RH}/R_R$ в методе Е.Ф. Сахно

Из зарубежной литературы можно узнать также о нескольких простых методах данного типа [19]. В частности, некоторую известность имеет формула Хоу (1976) для вычисления сопротивления барж на мелкой воде. Коэффициент влияния мелководья в этой формуле встроен в общую регрессионную формулу для сопротивления. То же можно сказать и о методе авторов работы [19].

Из [20] можно узнать об ещё одном упрощённом методе, разработанном в голландском институте MARIN. Согласно этому методу

$$k_T = R_h/R = 0,125 + 0,875 \left(k_1 + 0,4 \frac{B}{T} k_2 \right),$$

где B, T – ширина и осадка корпуса судна, $k_1 = 1 + 0,97 \exp(-2,74(h_T - 1))$, $k_2 = 0,75 \exp(-4,875(h_T - 1))$. Можно отметить некритериальную форму коэффициентов.

В [20] перечисляются ещё несколько простых методов пересчёта, в том числе модификация метода Геберса, однако эти формулы методов не приводятся, а литература, в которой они описаны, недоступна.

Для учёта влияния мелководья на скорость предлагались также простые формулы, в которых определялось снижение скорости на мелкой воде v_h :

$$v_h = k_h v, \quad (11)$$

где k_h – коэффициент снижения скорости.

В западной литературе упоминается практически одна формула Н. Lackenby [21]:

$$k_h = 1 - 0,1242 \left(\frac{A_M}{h^2} - 0,05 \right) - 1 + \left(\operatorname{th} \frac{1}{F_h^2} \right)^{\frac{1}{2}}.$$

Метод Х. Лакенби до сих пор рекомендуется к использованию в актуальных материалах ИТТС [22]. В [20] предполагается, что метод MARIN разработан на основе метода Лакенби, так как имеет очень близкие результаты, причём, видимо, оценки влияние мелкой воды по этим двум методам завышены.

В отечественной литературе можно найти несколько подобных методов, из которых самым известным будет метод Л.И. Фомкинского, данный в виде графиков [23]. Нами получена следующая аппроксимация этих графиков

$$k_h = \left(1 + 5,5 \frac{F_h^2}{h_T^{1,632}}\right)^{-0,322}.$$

Очень близкое выражение использовалось в [24]. Также Л.И. Фомкинским предлагалась формула на основе использования критериев подобия для решения задач обоснования судов [25]:

$$h_h = 1/\sqrt{1 - 2\Pi^2}, \quad \Pi = Fh \left(\frac{7B}{L}\right)^{0,25} / \sqrt{h_T}.$$

Другие формулы предлагались также К.Н. Шимко [26]

$$k_h = h^3 (h^3 + 0,015v^2T^2)^{-1},$$

а также В.А. Пискуновым [27] на основе испытаний, проведённых в ГИИВТе в 1975-1981 гг.:

$$k_h = \frac{h_T^{0,308T+1,225}}{h_T^{0,308T+1,225} + 0,867 - 0,507T}.$$

Формулы типа (11) можно использовать для расчёта эквивалентной скорости на глубокой воде и тем самым рассчитывать сопротивление на мелководье. Разумеется, это заведомо нестрогий способ, так как снижение скорости может состояться при постоянной частоте вращения винтов, при постоянной цикловой подаче топлива, при постоянной мощности, причём для одного и того же судна по-разному в зависимости от числа Фруда по глубине.

Судя по обзорам из [11; 12; 13], после создания метода Лакенби вплоть до 2001 г. за рубежом не было построено ни одного метода расчёта сопротивления на мелководье. Однако существенным дополнением к существующим гипотезам о сопротивлении на мелководье стала работа А. Миллварда, предложившего в 1989 г. на основе модельных испытаний метод корректировки форм-фактора на мелкой воде [28]:

$$k_F = k_{F\infty} + 0,644h_T^{-1,72},$$

где $k_{F\infty}$ и k_F – форм-фактор на глубокой и мелкой воде соответственно.

Как утверждается в [29], формула Миллварда показала хорошее соответствие с результатами конечно-разностного моделирования.

В 2001 г. был предложен метод Т. Цзяна (Т. Jiang) [30]. В этом методе на основании испытаний двух моделей судов внутреннего плавания постулируется, что сопротивление на мелководье будет выражаться функцией на глубокой воде, если использовать вместо заданной скорости расчётную, зависящую от величины просадки судна. Иначе говоря, метод Цзяна работает по формуле, аналогичной методу Звонкова, но в которой скорость местного обтекания, называемая в данном методе эффективной скоростью, вычисляется по выражению

$$v_0 = \sqrt{v^2 + 2gz_M/(1 - z_M/h)},$$

z_M – величина просадки на миделе.

В [20] утверждается, что метод Цзяна в дальнейшем не развивался, а имеющиеся данные показывают, что метод занижает величину сопротивления.

Методы пересчёта начала 21-го века

К началу 21-го века возможности вычислительной техники достигли уровня, при котором стало возможным решать трёхмерные задачи обтекания, что привело к появлению новых идей по построению методов учёта стеснённого потока. Однако при этом можно заметить, что в [31] на основе сравнения конечно-разностных результатов с модельными испытаниями утверждается, что при хорошем совпадении расчётов и опыта на глубокой воде, на мелкой воде имеются значительные расхождения.

Поэтому непосредственное использование конечно-разностного моделирования пока не даёт возможности строить методы расчёта, но позволяет изучать картину обтекания на качественно ином уровне.

На основе конечно-разностных экспериментов в 2016 г. был предложен метод Рейвена (Н. Raven). Последний его вариант описан в [32]. Метод рекомендуется к использованию в материалах ИТТС [22].

Согласно методу Рейвена общее сопротивление на мелкой воде R_T вычисляется по выражению

$$R_h(v) = R_F(v)k_s + R_V(v)k_Vk_s + R_W(v)k_s,$$

где $k_V = 1 + 0,57/h_T^{1,79}$ – корректирующий коэффициент сопротивления формы, а $k_s = (1 + \delta)^{\frac{2}{3}}$ – корректировка из-за увеличения водоизмещения в результате просадки судна, δ – относительное увеличение водоизмещения, определяемое по выражению

$$\delta = \min \left\{ \frac{A_W z_M}{\nabla}; 0,05 \right\},$$

где A_W – площадь ватерлинии, ∇ – объёмное водоизмещение судна.

Для вычисления величины просадки предлагается следующее выражение:

$$\frac{z_M}{L} = \max \left\{ 1,46 \frac{\nabla}{L^3} \left[\frac{F_h^2}{\sqrt{1 - F_h^2}} - \frac{F_{hD}^2}{\sqrt{1 - F_{hD}^2}} \right]; 0 \right\}$$

где $F_{hD}^2 = v/\sqrt{0,3gL}$.

Волновое сопротивление для чисел $Fh \leq 0,65$ считается неизменным. Это же неравенство ограничивает область применимости всего метода. Кроме этого, область применимости метода определяется ещё неравенством $h_T \geq 2$.

Хотя корректировка компонентов сопротивления предлагалась и ранее, но физическое обоснование было только в методе Сироткина и Рудина. В методе Рейвена корректировка k_V связывается с изменением форм-фактора на мелкой воде.

Следует при этом заметить, что непосредственное вычисление форм-фактора на мелкой воде с помощью конечно-разностных моделей невозможно, так как форм-фактор вычисляется из решения задачи обтекания дублированной модели, которую имеет смысл решать только в безграничном потоке. Для вычисления форм-фактора на мелкой воде при конечно-разностном моделировании из полного сопротивления вычитается сопротивление трения и предполагается, что волновое сопротивление при этом не изменилось существенно в отличие от случая глубокой воды, что может означать внесение неизвестной погрешности. Так проводились вычисления в [29]. Но обычно форм-фактор на мелкой воде вычислялся с помощью метода Прохаски [33]. Так было сделано в [14; 28; 32] Легко, однако, показать, что для судов в большой полнотой ($\delta \geq 0,8$) метод Прохаски неоднозначен, поэтому результаты корректировки форм-фактора также не могут пока считаться универсальными.

В 2019 г. был предложен метод К. Цзена (Q. Zeng), также основанный на численных экспериментах [14]. В этом методе вводится новая идея о зависимости форм-фактора k от числа Рейнольдса, а также применяется идея о влиянии стеснённого потока на коэффициент сопротивления трения c_F , которые корректируются по выражениям:

$$\frac{1+k}{(1+k)_\infty} = \left(a_1 + a_2/(\lg Re + a_3)^{a_4} (1 + a_5 h_T^{a_6}) \right), \frac{c_F}{c_{F\infty}} = 1 + \frac{c_1}{\lg Re + c_2} h_T^{c_3},$$

где $c_1, c_2, c_3, a_1, a_2, a_3, a_4, a_5, a_6$ – коэффициенты, зависящие от параметров корпуса судна.

В другом варианте метода Цзена корректировка коэффициента трения осуществляется только для обтекания днища, в то время как площадь бортов

увеличивается. Так вводится понятие эффективной осадки судна, при которой обтекание обычного потока равно обтеканию стеснённым потоком для исходного судна. Форм-фактор в этом варианте берётся по Миллварду.

Коэффициент волнового сопротивления корректируется по выражению:

$$k_W = \frac{c_W}{c_{W\infty}} = 1 + b_1 \lg Re - b_2 \exp(b_3 F_h^2),$$

где b_1, b_2, b_3 – коэффициенты, зависящие от корпуса судна.

То есть волновое сопротивление рассматривается в методе Цзена как зависящее не только от числа Фруда по глубине, но и от числа Рейнольдса, причем при $F_h < 0,54$ и $6 < \lg Re < 7,4$ принимается, что $k_W = 1$.

В работе [14] также показано, что пересчёт форм-фактора на условия мелкой воды по методам Миллварда и Рейвена даёт очень близкие результаты для испытанных в этой работе судов трёх типов. Тут можно заметить, что метод Цзена построен только для этих трёх типов судов и в части волнового сопротивления не обобщён на суда иных типов.

На базе методов Рейвена и Цзена также предложен гибридный метод [34], в котором от второго метода заимствуется влияние просадки. При этом волновое сопротивление не корректируется, так как метод предназначается для малых скоростей.

Выводы

В настоящее время в распространённых источниках описано коло 20 более или менее обоснованных методов пересчёта. Несмотря на появление новых методов, на старые продолжают ссылаться. Новые идеи, такие как коррекция коэффициента сопротивления формы или коэффициента сопротивления трения, не получили пока общепризнанного решения. При этом проверка этих идей прямыми модельными испытаниями невозможна. Новые методы разработаны на базе модельных испытаний или численных расчётов единичных судов и потому степень общности таких методов неясна.

Таким образом, простое описание существующих методов не позволяет предпочесть какой-то наилучший, пригодный для решения задач имитационного моделирования работы флота. Поэтому требуется анализ методов расчёта сопротивления на мелководье, что будет сделано в следующих статьях.

Список литературы

1. Recommended procedures and guidelines-captive model test // Proceedings of the 28th International Towing Tank Conference, pages 7.5–02–06–02, 2007. - URL: <https://www.itc.info/media/11866/75-02-06-02.pdf> (дата обращения 18.03.2026)
2. Звонков В.В. Судовые тяговые расчёты. М.: Гострансиздат, 1932 г. – 320 с.
3. Van Koningsveld M. Verheij H.J., Taneja P., De Vriend H.J. Ports and Waterways – Navigating the changing world. Delft, 2023. DOI: 10.5074/T.2021.004.
4. Павленко Г.Е. Сопротивление воды движению судов. М.: Морской транспорт, 1956. -508 с.
5. Schlichting O. Schiffswiderstand auf beschränkter Wassertiefe; Widerstand von Seeschiffen auf flachem Wasser. Jahrbuch der Schiffbautechnischen Gesellschaft (STG), volume 35, pages 127-148. Springer Verlag, Berlin. 1934. (Английский перевод статьи в Schlichting O. Ship's Resistance in Water of Limited Depth. US Experimental Model Basin, Washington. Translation N. 56. Januar, 1940.). - URL: <https://dome.mit.edu/handle/1721.3/51252>. (дата обращения 18.03.2026)
6. Report of Resistance Comitee. Proceedings of 11th ITTC, 1966. <https://itc.info/media/2707/report-of-resistance-committee.pdf> (дата обращения 18.03.2026)
7. Гирс И.В. Влияние мелководья на сопротивление судов Труды ВНИТОСС Т.3, вып. 1., 1938. – с. 62-63.

8. Басин А.М., Веледницкий И.О., Ляховицкий А.Г. Гидродинамика судов на мелководье / Л.: Судостроение, 1976 г. – 320 с.
9. Карпов А.В. Расчет сопротивления судов в стесненном водоёме Труды ГИИ. Т. 4 вып. 2. 1945.
10. Звонков, В.В. Судовые тяговые расчёты. – М.: Речной транспорт, 1956. - 324 с.
11. Алухтин П.А., Войткунский Я.И.. Сопротивление воды движению судов. Л.: МАШГИЗ, 1953. – 356 с.
12. Тихомиров Н.А. Ходкость судна / М.: Речной транспорт, 1959. – 200 с.
13. Harvald Sv. Aa. Resistance and Propulsion of Ships. John Willey & Sons, 1983. P. 362.
14. Latorre R., Luthra G., Tang K. Improvement of Inland waterway Vessel and Barge Tow Performance 1982 Report No 249, September 2022. Report number: 249. Affiliation: University of Michigan.
https://www.researchgate.net/publication/363539478_Improvement_of_Inland_waterway_Vessel_and_Barge_Tow_Performance_1982_Report_No_249 (дата обращения 18.03.2026)
15. Zeng, Q. A method to improve the prediction of ship resistance in shallow water. Dissertation or the purpose of obtaining the degree of doctor at Delft University of Technology, 2019.
<https://doi.org/10.4233/uuid:d4d8524a-fedc-4949-a953-f5848a1634bb>.
16. Анфимов В.Н., Ваганов Г.И., Павленко В.Г. Судовые тяговые расчёты / М.: Транспорт, 1970. – 244 с.
17. Ходкость и управляемость судов: Учебник для вузов / Под ред. В.Г. Павленко. М.: Транспорт, 1991. 397 с.
18. Справочник по теории корабля. Т.1. Л.: Судостроение, 1985. – 768 с.
19. Басин, А.М. Гидродинамика судов / А.М. Басин, В.Н. Анфимов. - Ленинград: Речной транспорт, 1961. — 684 с.
20. Skupień E, Prokopowicz J. Methods of calculating ship resistance on limited waterways // Polish Maritime Research, 4(84), 2014 Vol. 21. pp. 12-17. DOI: 10.2478/pomr-2014-0036.
21. Rotteveel E. Investigation of inland ship resistance, propulsion and manoeuvring using literature study and potential flow calculations. Master Thesis. Delft University of Technology, 2013. DOI:10.1007/s00773-018-0578-7.
22. Lackenby H. The Effect of Shallow Water on Ship Speed. – The Shipbuilder and Marine Enginebuilder, September 1963, p. 13-19. DOI: 10.1111/j.1559-3584.1964.tb04413.x.
23. ITTC Recommended Procedure 7.5-04-01-01.1. Preparation, Conduct and Analysis of Speed/Power Trials, 2017. URL: <https://www.ittc.info/media/8372/index.pdf> (дата обращения 18.03.2026)
24. Временная инструкция по планированию и нормированию расхода топлива для судов речного флота. – Москва: Речной транспорт, 1961. — 112 с.
25. Методическое руководство по разработке графика движения флота с применением электронных вычислительных машин. – М.: Транспорт. – 1970. – 176 с.
26. Фомкинский, Л.И. Методика тяговых расчётов при обосновании судов речного флота / Л.И. Фомкинский // Труды / ЦНИИЭВТ. — Москва, 1972. — Вып. 86. — 185 с.
27. Шимко, К.Н. определение скорости движения судов и составов при технико-экономических расчетах / К.Н. Шимко // Труды института комплексных транспортных проблем при Госплаве СССР, 1981. — №19. — С. 117 – 140.
28. Пискунов, В.А. Совершенствовать нормирование топлива / В.А. Пискунов, Г.А. Самыкин, Е.М. Тумаринсон // Речной транспорт. — 1983. — № 3. — С. 28.
29. Millward, A. The effects of water depth on hull form factor. International Ship-building Progress, Vol. 36, No. 407, October 1989. p. 283–302.
30. Tохopoulos S. L. Viscous-flow calculations for kvlcc2 in deep and shallow water // IV International Conference on Computational Methods in Marine Engineering, 2011. pp. 361-358. – URL: https://www.researchgate.net/publication/257817328_Viscous-flow_calculations_for_KVLCC2_in_deep_and_shallow_water (дата обращения 18.03.2026)
31. Jiang T. A New Method For Resistance and Propulsion Prediction of Ship Performance in Shallow Water Proceeding oh 8th PRADS Conference, December 2001. pp.509-515. DOI:10.1016/B978-008043950-1/50064-8.
32. Deng G.B., Guilmineau E., Leroyer A., Queutey P., Visonneau M., Wackers J. Simulation of Container Ship in Shallow Water at Model Scale and Full Scale // Third Chinese National CFD Symposium on Ship and Offshore Engineering, 2014, Dalian, China. – URL: https://www.researchgate.net/publication/282298211_Simulation_of_Container_Ship_in_Shallow_Water_at_Model_Scale_and_Full_Scale (дата обращения 18.03.2026)

33. Raven H.C. A method to correct shallow-water model tests for tank wall effects. *J. Mar. Sci. Technol.* 2018, 24, 437–453. DOI: 10.1007/s00773-018-0563-1.
34. Prohaska C. A simple method for the evaluation of the form factor and low speed wave resistance // *Proceedings 11th ITTC*, 1966.
35. Zhang, C., Ringsberg, J., Thies, F. Development of a ship performance model for power estimation of inland waterway vessels. *Ocean Engineering*, 287. 2023. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.oceaneng.2023.115731>.

References

1. Recommended procedures and guidelines captive model test // *Proceedings of the 28th International Towing Tank Conference*, pages 7.5–02–06–02, 2007. - URL: <https://www.ittc.info/media/11866/75-02-06-02.pdf> (data obrashcheniya 18.03.2026)
2. Zvonkov V.V. *Sudovye tyagovye raschety*. M.: Gostransizdat, 1932 g. – 320 s.
3. Van Koningsveld M. Verheij H.J., Taneja P., De Vriend H.J. *Ports and Waterways – Navigating the changing world*. Delft, 2023. DOI: 10.5074/T.2021.004.
4. Pavlenko G.E. *Soprotivlenie vody dvizheniyu sudov*. M.: Morskoi transport, 1956. -508 s.
5. Schlichting O. Schiffswiderstand auf beschränkter Wassertiefe; Widerstand von Seeschiffen auf flachem Wasser. *Jahrbuch der Schiffbautechnischen Gesellschaft (STG)*, volume 35, pages 127-148. Springer Verlag, Berlin. 1934. (Angliiskii perevod stat'i v Schlichting O. Ship's Resistance in Water of Limited Depth. US Experimental Model Basin, Washington. Translation N. 56. Januar, 1940.). - URL: <https://dome.mit.edu/handle/1721.3/51252>. (data obrashcheniya 18.03.2026)
6. Report of Resistance Comitee. *Proceedings of 11th ITTC*, 1966. <https://itcc.info/media/2707/report-of-resistance-committee.pdf> (data obrashcheniya 18.03.2026)
7. Girs I.V. Vliyaniye melkovod'ya na soprotivlenie sudov *Trudy VNITOSS T.3*, vyp. 1., 1938. – s. 62-63.
8. Basin A.M., Velednitskii I.O., Lyakhovitskii A.G. *Gidrodinamika sudov na melkovod'e / L.: Sudostroenie*, 1976 g. – 320 s.
9. Karpov A.V. *raschet soprotivleniya sudov v stesennom vodoeme Trudy GII*. T. 4 vyp. 2. 1945.
10. Zvonkov, V.V. *Sudovye tyagovye raschety*. – M.: Rechnoi transport, 1956. - 324 s.
11. Apukhtin P.A., Voitkunsii Ya.I.. *Soprotivlenie vody dvizheniyu sudov*. L.: MASHGIZ, 1953. – 356 s.
12. Tikhomirov N.A. *Khodkost' sudna / M.: Rechnoi transport*, 1959. – 200 s.
13. Harvald Sv. Aa. *Resistance and Propulsion of Ships*. John Willey & Sons, 1983. P. 362.
14. Latorre R., Luthra G., Tang K. *Improvement of Inland waterway Vessel and Barge Tow Performance 1982 Report No 249*, September 2022. Report number: 249. Affiliation: University of Michigan. https://www.researchgate.net/publication/363539478_Improvement_of_Inland_waterway_Vesse_l_and_Barge_Tow_Performance_1982_Report_No_249 (data obrashcheniya 18.03.2026)
15. Zeng, Q. A method to improve the prediction of ship resistance in shallow water. *Dissertation or the purpose of obtaining the degree of doctor at Delft University of Technology*, 2019. <https://doi.org/10.4233/uuid:d4d8524a-fedc-4949-a953-f5848a1634bb>.
16. Anfimov V.N., Vaganov G.I., Pavlenko V.G. *Sudovye tyagovye raschety / M.: Transport*, 1970. – 244 s.
17. *Khodkost' i upravlyaemost' sudov: Uchebnik dlya vuzov / Pod red. V.G. Pavlenko*. M.: Transport, 1991. 397 s.
18. *Spravochnik po teorii korablya*. T.1. L.: Sudostroenie, 1985. – 768 s.
19. Basin, A.M. *Gidrodinamika sudov / A.M. Basin, V.N. Anfimov*. - Leningrad: Rechnoi transport, 1961. — 684 s.
20. Skupień E, Prokopowicz J. *Methods of calculating ship resistance on limited waterways // Polish Maritime Research*, 4(84), 2014 Vol. 21. pp. 12-17. DOI: 10.2478/pomr-2014-0036.
21. Rotteveel E. *Investigation of inland ship resistance, propulsion and manoeuvring using literature study and potential flow calculations*. Master Thesis. Delft University of Technology, 2013. DOI:10.1007/s00773-018-0578-7.
22. Lackenby H. *The Effect of Shallow Water on Ship Speed*. – *The Shipbuilder and Marine Enginebuilder*, September 1963, p. 13-19. DOI: 10.1111/j.1559-3584.1964.tb04413.x.

23. ITTC Recommended Procedure 7.5-04-01-01.1. Preparation, Conduct and Analysis of Speed/Power Trials, 2017. URL: <https://www.ittc.info/media/8372/index.pdf> (data obrashcheniya 18.03.2026)
24. Vremennaya instruktsiya po planirovaniyu i normirovaniyu raskhoda topliva dlya sudov rechnogo flota. – Moskva: Rechnoi transport, 1961. — 112 s.
25. Metodicheskoe rukovodstvo po razrabotke grafika dvizheniya flota s primeneniem ehlektronnykh vychislitel'nykh mashin. – M.: Transport. – 1970. – 176 s.
26. Fomkinskii, L.I. Metodika tyagovykh raschetov pri obosnovanii sudov rechnogo flota / L.I. Fomkinskii // Trudy / TSNIEHVT. — Moskva, 1972. — Vyp. 86. — 185 s.
27. Shimko, K.N. opredelenie skorosti dvizheniya sudov i sostavov pri tekhniko-ehkonomicheskikh raschetakh / K.N. Shimko // Trudy instituta kompleksnykh transportnykh problem pri Gosplave SSSR, 1981. — №19. — S. 117 – 140.
28. Piskunov, V.A. Sovershenstvovat' normirovanie topliva / V.A. Piskunov, G.A. Samykin, E.M. Tumarinson // Rechnoi transport. — 1983. — № 3. — S. 28.
29. Millward, A. The effects of water depth on hull form factor. International Ship-building Progress, Vol. 36, No. 407, October 1989. p. 283–302.
30. Toxopeus S. L. Viscousflow calculations for kvlcc2 in deep and shallow water // IV International Conference on Computational Methods in Marine Engineering, 2011. pp. 361-358. – URL:https://www.researchgate.net/publication/257817328_Viscous-flow_calculations_for_KVLCC2_in_deep_and_shallow_water (data obrashcheniya 18.03.2026)
31. Jiang T. A New Method For Resistance and Propulsion Prediction of Ship Performance in Shallow Water Proceeding oh 8th PRADS Conference, December 2001. pp.509-515. DOI:10.1016/B978-008043950-1/50064-8.
32. Deng G.B., Guilmineau E., Leroyer A., Queutey P., Visonneau M., Wackers J. Simulation of Container Ship in Shallow Water at Model Scale and Full Scale // Third Chinese National CFD Symposium on Ship and Offshore Engineering, 2014, Dalian, China. – URL: https://www.researchgate.net/publication/282298211_Simulation_of_Container_Ship_in_Shallow_Water_at_Model_Scale_and_Full_Scale (data obrashcheniya 18.03.2026)
33. Raven H.C. A method to correct shallow-water model tests for tank wall effects. J. Mar. Sci. Technol. 2018, 24, 437–453. DOI: 10.1007/s00773-018-0563-1.
34. Prohaska C. A simple method for the evaluation of the form factor and low speed wave resistance // Proceedings 11th ITTC, 1966.
35. Zhang, C., Ringsberg, J., Thies, F. Development of a ship performance model for power estimation of inland waterway vessels. Ocean Engineering, 287. 2023. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.oceaneng.2023.115731>.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ / INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Платов Александр Юрьевич, д.т.н., доцент, зав. кафедрой прикладной информатики и статистики, Нижегородский архитектурно-строительный университет (ФГОУ ВО «ННГАСУ»), 603950, Н. Новгород, ул. Ильинская, 65, e-mail: platoff@mail.ru

Alexander J. Platov, Dr. Sci. Tech, head of Applied Informatics and Statistic Chair, Nizhny Novgorod State University of Architecture and Civil Engineering, 603950, Nizhny Novgorod, Ilyinskaya st., 65

Прокопенко Андрей Сергеевич, аспирант кафедры управления транспортом, Волжский государственный университет водного транспорта (ФГБОУ ВО «ВГУВТ»), 603951, г. Нижний Новгород, ул. Нестерова, 5, e-mail: a.prokopenko@internet.ru

Andrej S. Prokopenko, D Andrej S. Prokopenko, graduate student of Water Transport, Volga State University of Water Transport, 603951, Nizhny Novgorod, Nesterova st., 5

Статья поступила в редакцию 20.04.2026; принята к публикации 18.05.2026; опубликована онлайн 20.06.2026. Received 20.04.2026; published online 20.06.2026.