

Влияние полноты обводов корпуса на гидродинамическое сопротивление судов смешанного река-море плавания



А. В. Сверчков,
канд. техн. наук,
начальник сектора
ФГУП «Крыловский
государственный
научный центр»



Л. Г. Щемелин,
начальник сектора
ФГУП «Крыловский
государственный
научный центр»

В статье проанализированы результаты буксировочных испытаний моделей судов смешанного река-море плавания с различной полнотой обводов. Показано влияние полноты корпуса на его гидродинамическое сопротивление.

Повышение полноты обводов крупнотоннажных грузовых судов внутреннего и смешанного река-море плавания в последние десятилетия стало устойчивой тенденцией отечественного судостроения. Это произошло благодаря прежде всего работам ООО «Морское инженерное бюро» [1, 2].

Для внутренних водных путей России с жесткими ограничениями главных размерений судна увеличение коэффициента общей полноты корпуса судна – единственный способ повышения его грузоподъемности. Эта понятная идея получила полную поддержку судовладельцев, и за короткое время были построены десятки самоходных судов со сверхвысокими значениями коэффициента общей полноты. Такие суда, максимально соответствующие габаритам шлюзов Волго-Балтийского водного пути (длина судна порядка 140 м, ширина 16,5–16,9 м, осадка в реке 3,6 м, эксплуатационная скорость хода 8,0–12,5 уз.), строятся в России в последнее время. Потребность в них сохранится и в будущем.

Однако наряду с увеличением полноты обводов и грузоподъемности повышается гидродинамическое сопротивление судна, в основном за счет волновой составляющей, а значит, растут потребная мощность и расход топлива главных двигателей.

Естественно, возникает вопрос о разумном, экономически оправданном пределе увеличения полноты обводов, его оптимальном значении для судов внутреннего и смешанного плавания. К сожалению, до сих пор не получен научно обоснованный ответ на этот

принципиально важный вопрос. Имеющиеся публикации по этой актуальной тематике носят, как правило, частный характер, относящийся к конкретному проекту. Нам не известны публикации, содержащие сопоставительный анализ экспериментальных данных по сопротивлению судов внутреннего и смешанного плавания с традиционной и с увеличенной полнотой обводов.

Данная работа представляет собой по сути первую попытку разобраться в этих вопросах с позиций гидродинамики, опираясь на результаты модельных испытаний группы судов, габариты которых близки к максимально возможным для внутренних водных путей европейской части России. Исходной информацией для выполнения сопоставительных оценок стали результаты модельных испытаний, выполненных в разные годы на крупномасштабных моделях в опытовых бассейнах ФГУП «Крыловский государственный научный центр». Все испытания проводили по одинаковой методике с использованием сертифицированной измерительной техники.

Выбор моделей для сопоставительного анализа

Не претендуя на полноту учета всех эксплуатационных факторов, рассматривается движение моделей с различными значениями коэффициента полноты только на тихой глубокой воде. Влияние волнения и мелководья не учитывается вследствие недостатка и разрозненности исходной информации.

Чтобы сопоставить буксировочное сопротивление корпусов, имеющих разные обводы, обычно используют коэффициент остаточного сопротивления.

По сути это безразмерное остаточное сопротивление (полное сопротивление за вычетом сопротивления трения эквивалентной пластины, что примерно равно сумме сопротивления формы и волнового сопротивления), приходящееся на один квадратный метр смоченной поверхности корпуса. Однако при таком подходе не учитывается часть сопротивления (как трения, так и остаточного), обусловленная разницей площадей смоченной поверхности корпуса. Иными словами, в том случае, когда два судна имеют одинаковое буксировочное сопротивление, но разные площади смоченной поверхности, у судна с большей замкнутой площадью коэффициент остаточного сопротивления меньше.

Конечно, правильнее было бы сравнивать суда по энергетическим затратам на тонну перевозимого груза. Однако и такой подход оказался невозможен, поскольку рассмотренные суда предназначены для перевозки разных типов грузов (наливных и сухогрузных) и, соответственно, имеют разные коэффициенты утилизации водоизмещения по грузоподъемности.

Кроме того, суда различаются классом по району плавания и конструктивными особенностями:

- ледовой категорией;
- типом движителя (открытые гребные винты, гребные винты в насадках, винто-рулевые колонки);
- оформлением валов (кронштейны или выкружки);
- наличием или отсутствием рулей, подруливающих устройств и скуловых килей.

Поэтому чтобы при анализе избежать влияния второстепенных факторов, было принято решение сравнивать только результаты буксировочных испытаний «голым» корпусом (без выступающих частей) при водоизмещениях, соответствующих осадке «в море» и «в реке». Осадка «в море» приоритетна, так как именно для нее подбираются параметры двигателей и гребных винтов.

По правилам Российского морского регистра судоходства и Российского речного регистра, коэффициент общей полноты судна определяется выражением

$$C_B = \nabla / (L_{pp} \cdot B \cdot T),$$

где ∇ – объемное водоизмещение;
 L_{pp} – длина между перпендикулярами;
 B – ширина корпуса;
 T – осадка.

При движении в грузу как в море, так и в реке суда, как правило, удифферентованы на ровный киль, поэтому в качестве осадки T можно принимать заглубление миделя. С определением ширины корпуса и положением носового перпендикуляра проблем не возникает. Для кормового перпендикуляра, который традиционно должен проходить по оси баллера руля, нет общепринятого правила расположения на судах с гребными винтами в поворотных насадках или с винто-рулевыми колонками. Поэтому для анализа был принят коэффициент общей полноты, вычисленный по длине судна по ватерлинии по формуле

$$C_B = \nabla / (L_{WL} \cdot B \cdot T),$$

где L_{WL} – длина по действующей ватерлинии.

И с позиций гидродинамики такой подход представляется более обоснованным.

Для исключения влияния способа пересчета сопротивления с модели на натурное судно было решено проводить сравнение по экспериментальным данным для моделей.

Учитывая изложенные соображения, в качестве параметра сравнения был принят коэффициент K , который представляет собой буксировочное сопротивление модели «голым» корпусом, отнесенное к ее весовому водоизмещению:

$$K = R_T / (g \cdot \nabla \cdot \rho),$$

где R_T – буксировочное сопротивление модели «голым» корпусом, H ;

g – ускорение свободного падения, $g = 9,8065 \text{ м/с}^2$;

∇ – водоизмещение модели, м^3 ;

ρ – плотность воды в опытовом бассейне,

$\rho = 1000 \text{ кг/м}^3$.

Коэффициент K показывает, какое буксировочное сопротивление приходится на единицу веса модели при данной скорости.

В качестве безразмерной скорости традиционно принято число Фруда, вычисленное по длине корпуса по ватерлинии:

$$Fn = \frac{V}{\sqrt{g \cdot L_{WL}}}$$

где V – скорость модели, м/с .

Анализируемый диапазон чисел Фруда был выбран в промежутке от 0,09 до 0,17 с шагом 0,01. Соответствующие этому диапазону значения скорости для судна, имеющего длину по ватерлинии 140 м, приведены в *таблице*.

Всего были проанализированы результаты испытаний 14 моделей с C_B от 0,82 до 0,94 при осадке «в море» и 17 моделей с C_B от 0,815 до 0,930 при осадке «в реке».

Диапазон исследуемых значений скорости

Fn	V		
	км/ч	узлы	м/с
0,09	12,01	6,48	3,33
0,10	13,34	7,20	3,71
0,11	14,67	7,92	4,08
0,12	16,01	8,64	4,45
0,13	17,34	9,36	4,82
0,14	18,67	10,08	5,19
0,15	20,01	10,80	5,56
0,16	21,34	11,52	5,93
0,17	22,68	12,24	6,30

Все рассмотренные модели представляют суда, оснащенные двухвальными пропульсивными комплексами.

Результаты анализа

Результаты испытаний моделей при осадках «в море» и «в реке» представлены в виде зависимостей коэффициента K :

- от коэффициента общей полноты C_B при заданных значениях числа Фруда (*рис. 1, 2*);
- от числа Фруда при заданных значениях коэффициента общей полноты C_B (*рис. 3, 4*).

Зависимости были получены аппроксимацией значений коэффициента K для рассмотренных моделей полиномами 3-й степени, что позволило выявить основные тенденции, хотя отмечался «разброс» анализируемых данных.

Как видно из графиков, приведенных на *рис. 1* и *3*, при осадке «в море» на доволновых режимах движения ($Fn \leq 0,11$) полнота корпуса практически не влияет на коэффициент K . По мере роста скорости увеличение полноты начинает оказывать все большее негативное влияние на коэффициент K . Кроме того, точка начала роста значения K смещается влево, в сторону судов с меньшей полнотой обводов.

В случае движения с уменьшенной осадкой (*рис. 2, 4*) картина влияния полноты на коэффициент сопротивления аналогична таковой в случае движения с осадкой «в море».

Приведенные экспериментальные материалы позволяют сделать важное заключение, что для транспортных судов смешанного река-море плавания следует применять такие обводы корпуса, у которых коэффициент общей полноты, вычисленный по длине корпуса по ватерлинии, не превышает значения 0,90. В противном случае при движении со скоростью 11,5 уз. ($Fn = 0,16$), наиболее характерной для судов смешанного

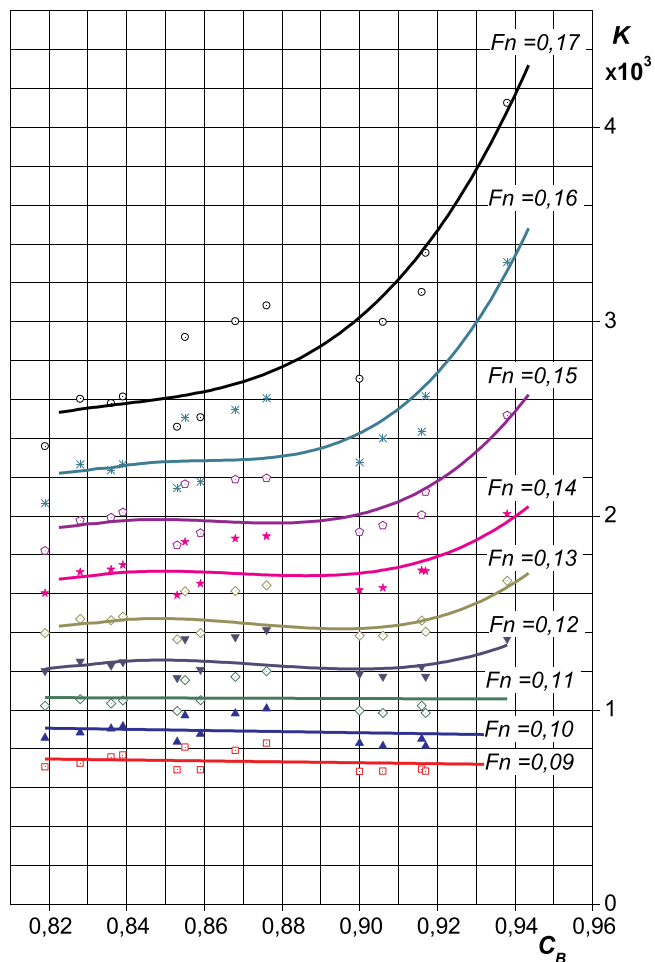


Рис. 1. Зависимости коэффициента K моделей от коэффициента общей полноты C_B для заданных значений числа Фруда F_n при осадке «в море»

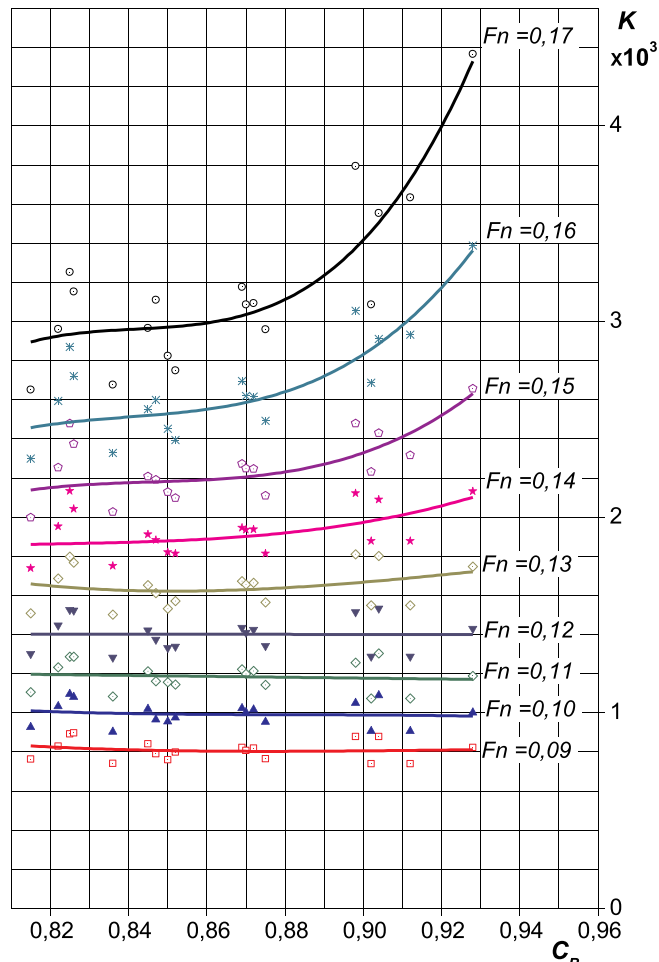


Рис. 2. Зависимости коэффициента K моделей от коэффициента общей полноты C_B для заданных значений числа Фруда F_n при осадке «в реке»

плавания, увеличение коэффициента общей полноты на 0,01 приводит к возрастанию гидродинамического сопротивления судна примерно на 10 %. На большой скорости сопротивление возрастает значительно. Полученные результаты еще раз подтвердили рекомендацию [3] не эксплуатировать суда со сверхвысокими значениями коэффициента общей полноты на скорости, превышающей 10 уз.

Весьма показательны результаты испытаний модели сухогруза смешанного река-море плавания дедвейтом 8500 т [4], корпус которого первоначально имел коэффициент общей полноты $C_B = 0,917$. Сначала эта модель была испытана при $C_B = 0,917$. Фотографии картины волнообразования в районе носовой оконечности для значений скорости, соответствующих 11,5 и 12,5 уз. ($F_n = 0,160$ и $F_n = 0,173$, соответственно) приведены на рис. 5. Вследствие значительного волнообразования в районе носовой оконечности (рис. 5, фото слева) было принято решение заострить носовые ветви ватерлиний. При этом цилиндрическая вставка и кормовая оконечность были сохра-

нены без изменений. Длина модели, ширина и осадка также не изменились. В результате уменьшения водоизмещения значение коэффициента общей полноты при осадке «в море» снизилось с 0,917 до 0,906.

Модель с измененной носовой оконечностью была испытана при тех же условиях, что и модель с более полными обводами. Если сравнивать фото справа и слева на рис. 5, видно, насколько снизилась интенсивность волнообразования при уменьшении полноты носовых обводов.

Сравнение коэффициентов K двух вариантов модели приведено на рис. 6. В нижней части рисунка показана величина ΔK , это относительное увеличение сопротивления (%) относительно сопротивления модели с $C_B = 0,906$.

Увеличение коэффициента общей полноты на 0,01 привело к росту сопротивления на 10 % при скорости 11,5 уз. ($F_n = 0,160$) и на 13 % при скорости 12,5 уз. ($F_n = 0,173$).

Еще раз следует подчеркнуть, что сравниваются безразмерные величины сопротивления, отнесенные к весу мо-

дели, и рост коэффициента K обусловлен не увеличением водоизмещения, а увеличением полноты носовых обводов корпуса.

Приведенные экспериментальные материалы позволяют заключить, что для транспортных судов смешанного река-море плавания целесообразно применять обводы корпуса с коэффициентом общей полноты, вычисленным по длине корпуса по ватерлинии, в диапазоне 0,84–0,88 и не следует допускать превышения значения 0,90. В противном случае при движении судна со скоростью 11,5 уз. каждое дополнительное увеличение C_B на 0,01 приводит к росту гидродинамического сопротивления судна примерно на 10 %. Поддержание заданной скорости хода при повышении сопротивления требует увеличения мощности главных двигателей, расхода топлива, соответственно, и увеличения объемов топливных цистерн.

Для речных тихоходных судов, если их скорость не превышает 16 км/ч ($F_n < 0,12$), увеличение коэффициента общей полноты до 0,93 практически не

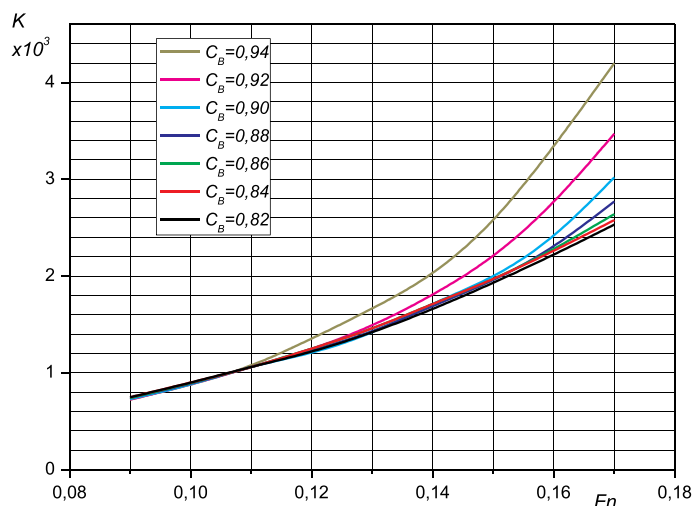


Рис. 3. Зависимости коэффициента K моделей от числа Фруда F_n для заданных значений коэффициента общей полноты C_B при осадке «в море»

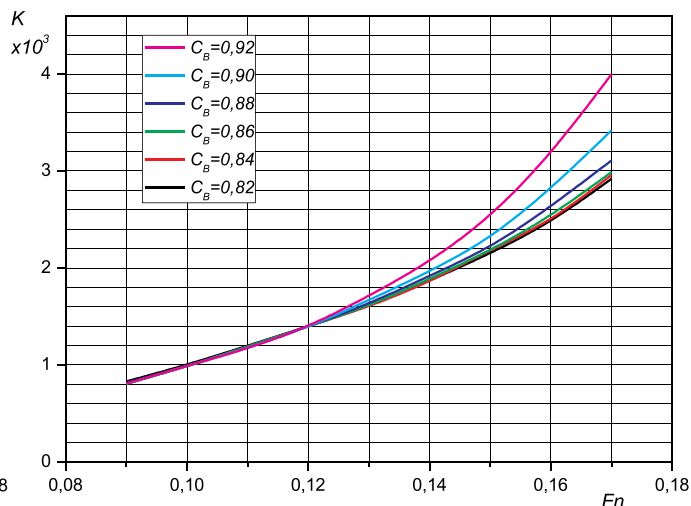


Рис. 4. Зависимости коэффициента K моделей от числа Фруда F_n для заданных значений коэффициента общей полноты C_B при осадке «в реке»

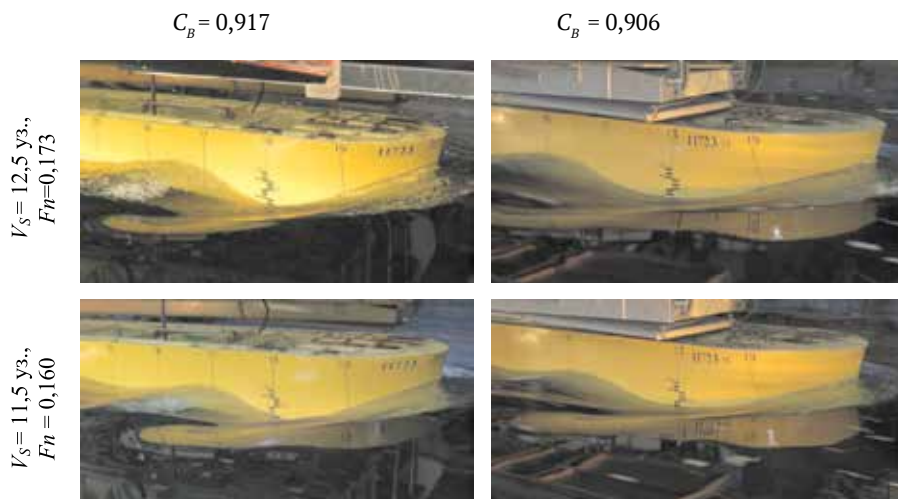


Рис. 5. Фотографии обтекания носовой оконечности модели с разными коэффициентами общей полноты

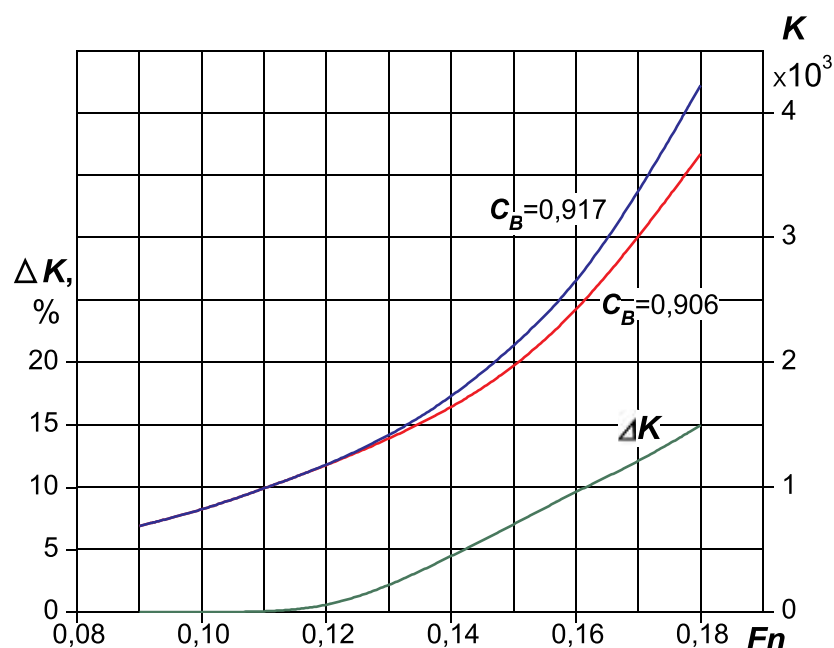


Рис. 6. Сравнение коэффициентов K двух вариантов модели с разными коэффициентами общей полноты C_B

сказывается на величине коэффициента сопротивления.

Заключение основано на результатах анализа модельных исследований гидродинамических качеств судна. Чтобы определить финансовый результат влияния полноты корпуса на стоимость перевозок, следует выполнить экономический анализ для конкретных линий эксплуатации судов смешанного плавания с учетом увеличения объемов и тарификации перевозимого груза. ■

Литература

1. Егоров Г. В. О возможности создания судна смешанного река-море плавания с предельно высоким коэффициентом общей полноты // Труды Крыловского гос. науч. центра. 2013. № 75 (359). С. 6–14.
2. Егоров Г. В., Егоров А. Г. Основные принципы проектирования судов смешанного река-море плавания // Судостроение и морская инфраструктура. 2014. № 2 (2). С. 48–62.
3. Егоров Г. В., Колесник Д. В. Оценка энергоэффективности судов ограниченного и смешанного районов плавания // Материалы всеукраинской науч.-техн. конф. с междунар. участием «Современные технологии проектирования, строительства, эксплуатации и ремонта судов, морских технических средств и инженерных сооружений». Николаев: НУК, 2013. С. 60–61.
4. Горбачев Ю. Н., Буянов А. С., Сверчков А. В. Перспективный способ совершенствования конструкции судов внутреннего и смешанного река-море плавания // Речной транспорт (XXI век). 2014. № 6. С. 28–34.