



УДК 629.12

**Кочнев Юрий Александрович**, доцент, к.т.н., доцент кафедры проектирования и технологии постройки судов

Волжский государственный университет водного транспорта  
603951, г. Нижний Новгород, ул. Нестерова, 5.

**Гуляев Илья Александрович**, начальник отдела

ФАУ Российский Речной Регистр.

105187, г. Москва, Окружной проезд, 15

### ПРОГНОЗИРОВАНИЕ СОПРОТИВЛЕНИЯ ДВИЖЕНИЮ ГРУЗОВЫХ КОМБИНИРОВАННЫХ СУДОВ В ЗАДАЧЕ ИХ ОПТИМИЗАЦИИ

*Аннотация.* Расчёт сопротивления воды движению судна с максимальной точностью важен на всех этапах проектирования. В статье рассмотрены возможность применения на этапе исследовательского проектирования метода пересчёта сопротивления с судна прототипа и метод Holtrup-Mennen. В связи с неудовлетворительной точностью последнего метода, для комбинированных судов смешанного (река-море) плавания введён дополнительный коэффициент, учитывающий особенности геометрии корпуса рассматриваемых судов.

*Ключевые слова:* комбинированное судно, сопротивление воды движению, пересчёт с прототипа, метод Holtrup-Mennen

На обоснование оптимальных элементов и характеристик судна на ряду с другими факторами существенно влияние оказывает мощность судовой эн установки. Мощность главных двигателей через затраты на топливо в большой мере определяют эксплуатационные расходы по судну. В свою очередь, подобрать и согласовать гребной винт и главные двигатели можно только при достоверном определении сопротивления воды движению судна. На этапе исследовательского проектирования эта задача усложняется ограниченностью известных величин о судне.

В теории проектирования судна многочисленные методы расчёта гидродинамического сопротивления и мощности СЭУ объединены в 4 группы [1]. Применительно к грузовым судам внутреннего и смешанного плавания в работах [2,3] были проанализированы или методы определения сопротивления в целом, или остаточной составляющей, которая в большинстве случаев и вызывает основные затруднения в определении. Используя результаты указанных работ, можно сделать вывод, что наилучшие результаты по прогнозированию сопротивления, для судов с современными обводами достигаются или при использовании метода пересчёта с судна-прототипа [3,5] или метод Holtrup-Mennen [3,5]. Однако оба метода имеют ряд ограничений, прежде всего по величине коэффициента общей полноты  $\delta$ , который для новых судов, предназначенных для комбинированной перевозки как сухих (на палубе), так и наливных (в корпусе) грузов, может достигать величины 0,93...0,94. При этом корпус судна практически не имеет бульба в традиционном его понимании.

В методе пересчёта в судна прототипа сопротивление воды определяется квадратичным законом сопротивления

$$R = 0,5\rho\xi Sv^2, \quad (1)$$

где  $S$  – смоченная поверхность;

$v$  – скорость хода;

$\xi$  – коэффициент сопротивления, равный

$$\xi = \xi_f + \xi_o + \xi_{дон}, \quad (2)$$

где  $\xi_f, \xi_o, \xi_{дон}$  – соответственно коэффициенты сопротивления трения, остаточного и дополнительного сопротивлений.

Именно коэффициент остаточного сопротивления пересчитывается с подобного коэффициента судна прототипа:

$$\xi_o = \xi'_o \times \frac{\kappa_{L/B}}{\kappa'_{L/B}} \times \frac{\kappa_{B/T}}{\kappa'_{B/T}} \times \frac{\kappa_\delta}{\kappa'_\delta} \frac{\omega'}{\omega}, \quad (3)$$

где  $\xi'_o$  – коэффициент остаточного сопротивления судна-прототипа;

$\kappa_{L/B}, \kappa'_{L/B}, \kappa_{B/T}, \kappa'_{B/T}, \kappa_\delta, \kappa'_\delta$  – коэффициенты влияния  $L/B, B/T, \delta$  проектируемого судна и судна-прототипа;

$\omega', \omega$  – относительная смоченная поверхность судна-прототипа и проектируемого судна.

Коэффициенты влияния представляются в виде графиков [4]:

$$\begin{aligned} \kappa_{L/B} &= f_1\left(\left(L/B\right)^2, Fr_V\right), \\ \kappa_{B/T} &= f_2\left(B/T, Fr_V\right), \\ \kappa_\delta &= f_2\left(\delta, Fr_V\right). \end{aligned} \quad (4)$$

В [2] приведённые в [4] база данных прототипов расширена значениями коэффициента остаточного сопротивления судов с необходимым обхватом относительных величин геометрии корпуса судна. Указанные графики имеют плавную форму и экстраполируются в требуемые диапазоны значений  $L/B, B/T, \delta$  для современных судов.

Имеющие в [4] набор прототипов так же расширяется.

Судно смешанного (река-море) плавания часто эксплуатируется на мелководных участках рек, вследствие чего возможно существенное увеличение его сопротивления

Е.Ф. Сахно [6] на основе систематических испытания моделей с различными формами носовой и кормовой оконечности ввёл коэффициент увеличения остаточного сопротивления на мелководье:

$$K = \frac{\xi_{oH}}{\xi_{o\infty}}, \quad (5)$$

где  $\xi_{oH}$  – коэффициент остаточного сопротивления модели при глубине  $H$ ;

$\xi_{o\infty}$  – коэффициент остаточного сопротивления модели на глубокой воде.

Коэффициент рассчитывается при одинаковых числах Фруда. При этом если отношение  $L/B$  проектируемого судна отличается от базового, равного 8,5, то числа Фруда корректируются на поправку  $\beta$ , определяемую в зависимости от типа обводов носовой оконечности и соотношения длины к ширине судна. Рассматриваются три носовые оконечности: «глубокая ложка», бульбообразная, цилиндрическая; и три кормовых: ложкообразная, санеобразная, эллиптическая.

Эксплуатация судна смешанного плавания на морском участке связана с возможностью попадания рейса на значительное волнение, которое может или превышать допустимое, тогда судно должно будет встать в порту убежище, или снижать эксплуатационную скорость. Наиболее приемлемо, с точки зрения расчёта необходимых

параметров и точности элементов рейса, для задачи оптимизации элементов и характеристик танкера, использование следующей зависимости в виде относительной потери скорости:

$$\frac{\Delta v}{v} = 50 \left( \frac{h_{1/3}}{L} \right)^2 \left[ Fr^{-1} - 3 \left( \frac{h_{1/3}}{L} \right)^{1/4} \right], \quad (6)$$

где  $\frac{\Delta v}{v}$  – относительная потеря скорости;

$h_{1/3}$  – высота значимых волн.

На наш взгляд, преимуществом метода пересчёта с прототипа является высокая точность прогнозирования сопротивления воды движению, при узком интервале изменения варьируемых характеристик судна, к которым в большинстве случаев относятся соотношения главных размерений и коэффициент общей полноты. Однако при существенном диапазоне варьирования, когда необходимо применение разных прототипов, в задачах исследовательского проектирования будут возникать ошибки, связанные с не рассматриваемыми особенностями геометрии судна.

Метод Holtrop-Mennen использует принцип Хьюза для определения сопротивления, то есть представление полного сопротивления  $R$  в виде суммы сопротивления трения ( $R_f$ ), сопротивления выступающих частей ( $R_{APP}$ ), волнового сопротивления ( $R_w$ ), дополнительного сопротивления бульбового носа ( $R_B$ ), и аэродинамического сопротивления ( $R_A$ )

$$R = (1 + k_1) R_f + R_{APP} + R_w + R_B + R_A, \quad (7)$$

где  $k_1$  – коэффициент, учитывающий изменение сопротивления трения в зависимости от формы корпуса судна.

Тестовые расчёты показали, что при больших значениях коэффициента общей полноты, характерных для комбинированных судов смешанного (река-море) плавания, метод Holtrop-Mennen дает увеличение сопротивления порядка 20%. В тоже время при малых значениях коэффициента  $\delta$  наблюдается наоборот занижение сопротивления порядка 10%. На наш взгляд это связано так же с большим, по сравнению с морскими судами соотношением  $B/T$ , изменяющим волнообразование и обтекание воды у судна.

Для исключения подобных погрешностей, авторами введена поправка в уравнение (7), учитывающая влияние коэффициента общей полноты и скорости хода судна на конечное значение сопротивления

$$R = \left[ (1 + k_1) R_f + R_{APP} + R_w + R_B + R_A \right] k_{\delta v}, \quad (8)$$

где  $k_{\delta v}$  – поправка для речных и судов смешанного (река-море) плавания, равная

$$k_{\delta v} = 3,51361 + 0,72753 \times v - 2,27834 \times \delta - 0,94725 \times v \times \delta. \quad (9)$$

Результаты с учётом полученного коэффициента по формуле (9), в качестве примера при расчёте сопротивления судна со сверх полными обводами (проект RST54  $\delta=0,932$ ) приведено на рис. 1, а для речных судов с традиционными обводами (проект P77  $\delta=0,823$ ) на рис. 2.

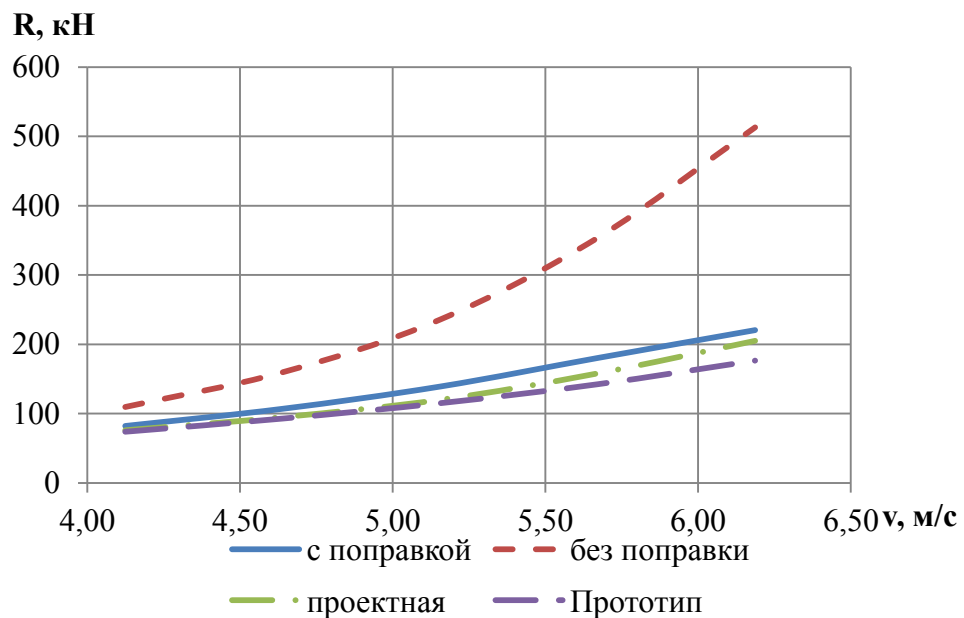


Рис. 1 – Сопоставление результатов расчёта кривой сопротивления воды движению судна с сверх полными обводами

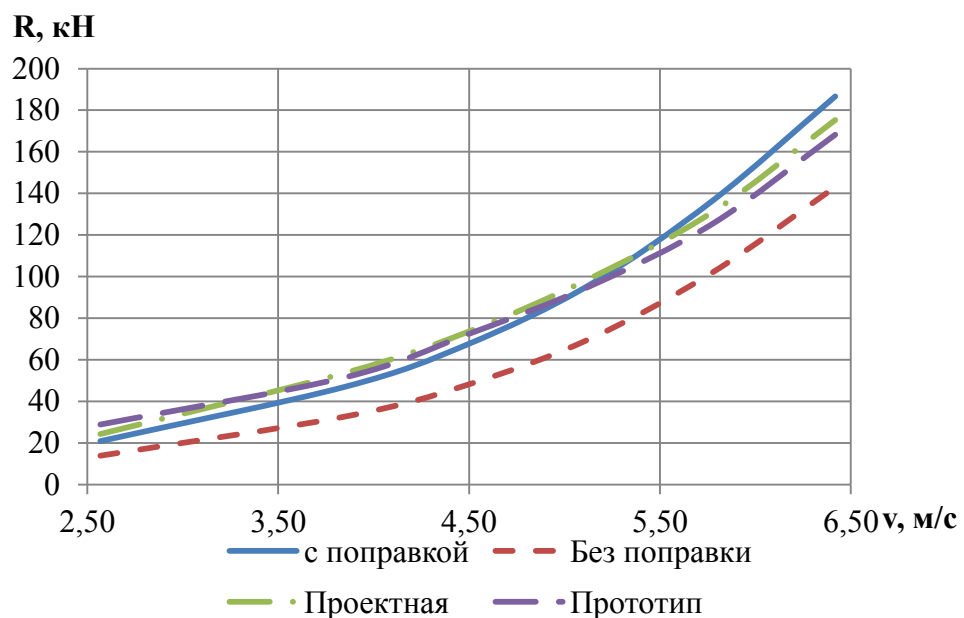


Рис. 2 – Сопоставление результатов расчёта кривой сопротивления воды движению судна с традиционными обводами

Применение метода Holtrop-Mennen позволяет учесть больше особенностей оптимизируемого судна, тем самым повысить чувствительность математической модели к изменению входных параметров. Однако на этапе исследовательского проектирования ряд из них, как например, размеры винто-рулевого комплекса, будут определяться по приближённым методикам и не дадут достаточной точности входных параметров для получения максимального эффекта. На наш взгляд, применение метода Holtrop-Mennen целесообразно при широком интервале варьируемых величин или при многоуровневой оптимизации, когда наряду с главными неизвестными оптимизируются и подсистемы судна, влияющие на его ходкость.

### Список литературы:

1. Ашик . Обоснование модели расчёта ходкости. // 12-й международный научно-промышленный форум «Великие реки '2010». Труды конференции. Том 2. – Н.Новгород: ННГАСУ 2011. – с. 300–302.
2. Кочнев Ю.А. Обоснование модели расчёта ходкости. // 12-й международный научно-промышленный форум «Великие реки '2010». Труды конференции. Том 2. – Н.Новгород: ННГАСУ 2011. – с. 300–302.
3. Платов А.Ю., Васильева О.Ю. Анализ применимости методов расчета коэффициента остаточного сопротивления для судов внутреннего плавания при эксплуатационно-экономическом обосновании новых судов // Вестник Волжской государственной академии водного транспорта. Выпуск 60. – Н. Новгород: Изд-во ФГБОУ ВО «ВГУВТ», 2019 – с. 193-202.
4. Басин А. М. Ходкость и управляемость судов. Учеб. Пособие для ВУЗов водн. трансп. М., «Транспорт», 1977. – 456с.
5. Holtrop J, Mennen G.G.J. A statistical power prediction method / International shipbuilding progress, vol. 25, October 1978.
6. Справочник по теории корабля: в 3-х томах. Т2. Статика судов. Качка судов / под ред. Я.И. Войткунского. – Л.: Судостроение – 1985. – 440с.

## LOAD MODELING ON WASTEWATER AND OIL-CONTAINING WATER ON OUT-OF-SHIP ENVIRONMENTAL PROTECTION

Yury A. Kochnev, Ilya A. Gulyaev

*Calculating the water resistance to ship movement with maximum accuracy is important at all design stages. The article considers the possibility of using the method of converting the resistance from the prototype vessel and the Holtrop-Mennen method at the research design stage. Due to the unsatisfactory accuracy of the latter method, an additional coefficient has been introduced for combined vessels of mixed (river-sea) navigation, taking into account the features of the hull geometry of the vessels in question.*

*Keywords: combined vessel, water resistance to movement, conversion from prototype, Holtrop-Mennen method.*