

ОЦЕНКА ВЛИЯНИЯ МЕЛКОВОДЬЯ НА ХОДОВЫЕ
ХАРАКТЕРИСТИКИ МОРСКИХ СУДОВ

Для морских судов, совершающих рейсы с заходом в речные порты, необходима оценка ходовых характеристик при переходе в стесненный фарватер, резком изменении глубины под килем и входе в воду с другой плотностью. Безопасность плавания в стесненных условиях обеспечивается не только правильным опознаванием ориентиров и знаков ограждения, учетом элементов течения и дрейфа при циркуляции, но также и учетом навигационного запаса глубины под килем ΔH с поправкой на ветровое волнение, а также выбором безопасной скорости хода v , при которой сохраняется надежная управляемость судна и одновременно исключается образование попутной поперечной волны и "проседание" судна ΔT (изменение осадки T) больше допустимого значения.

В работе [6] приведена математическая модель для оценки влияния ходовых характеристик судна в условиях нерегулярного ветрового волнения на ходкость одновинтового судна. Эта модель позволяет учесть и влияние мелководья – изменение осадки, критической скорости, сопротивления движению. Но для практических расчетов ходовых характеристик речных судов и составов, в модель должны быть внесены некоторые уточнения, исходящие из следующих положений.

Ограниченная глубина фарватера H влияет на все составляющие сопротивления воды движению судна, однако степень их изменения в условиях мелководья по сравнению с движением в условиях неограниченной глубины оказывается различной.

Влияние мелководья начинает проявляться при глубине, определяемой по формуле Г.Е. Павленко [4, с. 77], м:

$$H \leq 4T + \frac{3v^2}{g}.$$

Вследствие стеснения струй жидкости между дном водоема и корпусом судна возникает встречный поток ("вытеснения"). В результате возрастают скорости обтекания корпуса судна, что приводит, прежде всего, к заметному увеличению касательных напряжений и росту сопротивления трения. Кроме того, увеличиваются размеры области отрыва пограничного слоя в корме судна, что приводит к возрастанию сопротивления формы. У многих судов при безотрывном обтекании на

глубокой воде появляется отрыв пограничного слоя при движении на мелководье. Возникновение встречного потока сопровождается появлением под днищем движущегося судна пограничного слоя на дне водоема, а также понижением уровня свободной поверхности вблизи судна. Оба эти фактора, в свою очередь, приводят к добавочному стеснению струй жидкости, повышению скорости встречного потока и дополнительному возрастанию вязкостного сопротивления. Растет и волновое сопротивление, вызванное волнообразованием вокруг движущегося судна.

Для количественной оценки степени влияния мелководья принято использовать безразмерные параметры: отношение глубины фарватера к осадке судна H/T (как характеристика степени стеснения потока по глубине) и число Фруда по глубине $Fr_H = \frac{v}{\sqrt{gH}}$ (относительная

скорость движения судна в условиях ограниченной глубины). Эти величины приведены на рис. 1 при различных значениях скорости v для теплохода "Рени" (при полной загрузке, $T = 5,67$ м). Очевидно, что для приведенного диапазона скоростей кривые являются функциями:

$$Fr_H = k \sqrt{\frac{H}{T}},$$

где $k = 0,35 \div 0,69$ – для диапазона скоростей $v = 5 \div 10$ уз. соответственно.

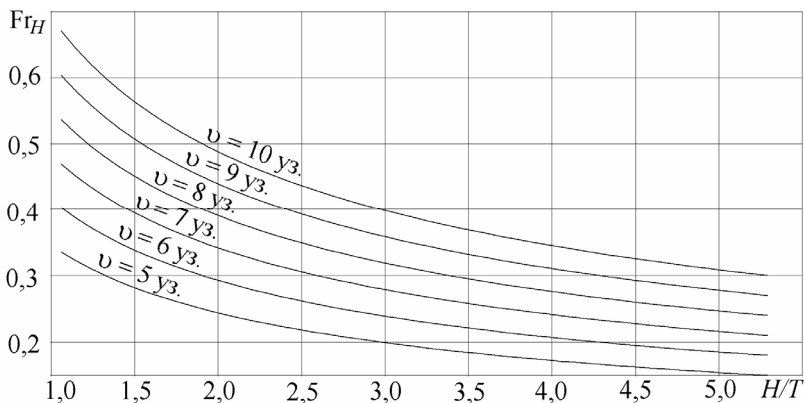


Рис. 1. Зависимость числа Фруда по глубине Fr_H от соотношения H/T

Что касается вязкостных составляющих сопротивления – сопротивления трения и формы – влияние мелководья на их увеличение

значительно при $H/T = 1,5 \div 2,5$ ($10 \div 15$ %); с увеличением соотношения $H/T > 3$ величина вязкостного сопротивления практически не отличается от величины на неограниченной глубине.

Наиболее ощутимо влияние мелководья сказывается на величине волнового сопротивления при $0,65 \leq Fr_H \leq 0,95$, когда в движение вовлекаются дополнительные массы воды и волновое сопротивление возрастает по сравнению с движением на глубокой воде с той же скоростью [5, с. 45]. Вследствие этого, вблизи бортов у кормовой части наблюдается дифферент (динамическая просадка на мелководье). При $Fr_H < 0,65 \div 0,70$ существенного изменения системы волнообразования не происходит (довольно режим на мелководье), а при $Fr_H < 0,30 \div 0,50$ для морских судов в условиях ограниченной глубины картина волнообразования не отличается от условий неограниченной глубины.

Для морских крупнотоннажных судов на мелководье характерно появление ходового дифферента на нос независимо от статической посадки судна. Для определения проседания судна с достаточной для практики точностью отдельно для носа и кормы рекомендуется универсальный метод Рёмиша [4, с. 84], согласно которому

$$\Delta T = 0,55 C_v C_{\delta} (H/T - 0,4)^{-0,2} (H - T), \quad (1)$$

где T – осадка носом или кормой, м; C_v – коэффициент, зависящий от скорости хода,

$$C_v = B \left(\frac{v}{v'_{кр}} \right)^2 \left[\left(\frac{v}{v'_{кр}} - 0,5 \right)^4 + 0,0625 \right];$$

v – скорость судна, м/с; $v'_{кр}$ – критическая скорость для мелководья, м/с,

$$v'_{кр} = 1,28 H^{0,625} \left(\frac{L}{TB} \right)^{0,125}; \quad (2)$$

C_{δ} – коэффициент, зависящий от формы корпуса.

Коэффициент C_{δ} определяется для носа $C_{\delta н}$ и для кормы $C_{\delta к}$:

$$\left. \begin{aligned} C_{\delta к} &= 1 \\ C_{\delta н} &= \frac{90 \delta^2 B^2}{L^2} \end{aligned} \right\}.$$

Наиболее распространенным и информативным методом исследования движения на мелководье являются модельные эксперименты в опытовых бассейнах, анализ результатов которых позволил сформировать наиболее общее представление о характере физических явле-

ний, имеющих место при движении судна на мелководье. Современный уровень развития компьютерной техники позволяет производить численное моделирование движения судна в условиях ограниченного по ширине и глубине фарватера. Серьезным недостатком как модельных экспериментов, так и численного моделирования можно считать наличие постоянного значения глубины фарватера, для которой и проводится эксперимент либо численное моделирование. В реальных условиях плавания глубина фарватера изменяется, нередко значительные перепады глубин [5], как показано на рис. 2.

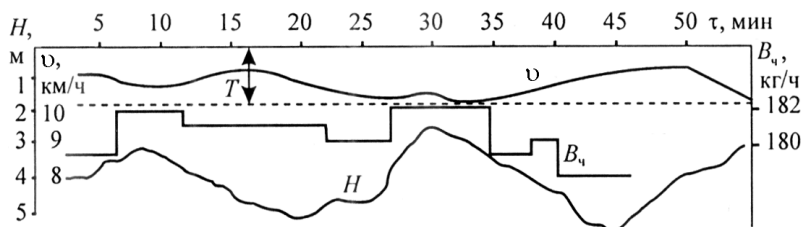


Рис. 2. Пример профилограммы изменения скорости хода v и часового расхода топлива $B_{\text{ч}}$ для речного судна в зависимости от глубины фарватера H

В 70–80-х годах под руководством проф. В.Г. Павленко проводились гидрологические изыскания более чем 30 магистральных и малых рек [3, с. 10], в результате которых введено понятие расчетной глубины – такой глубины, при движении на которой средняя скорость судна остается той же, что и средняя скорость при ходе по заданному фарватеру переменной глубины. При этом практически совпадают и суммарные расходы топлива, а инерционность судна при переходе судна с одной глубины на другую практически не влияет на величину расчетной скорости, и потому может не учитываться.

Определение сопротивления движению судна или состава в условиях плавания по реке Дунай имеет определенные особенности: при учете влияния ограниченной глубины не могут быть применены расчетные глубины, полученные в результате упомянутых исследований. Эхолотограммы и пересчет глубин судового хода реки Дунай к низкому судоходному и регуляционному уровню показывают варьирование средних глубин по участкам реки и по месяцам года в диапазоне $H_{\text{ср}}$ от 5,30 до 10,26 м.

Минимально допустимый запас глубины под килем ΔH – величина многокомпонентная, учитывающая колебания уровня воды ΔH_1 , минимальный навигационный запас глубины ΔH_2 (при котором обеспечивается управляемость судна), запас глубины на крен судна (от воз-

действия ветра или гидродинамических сил при маневрировании) ΔH_3 , запас глубины на погружение оконечностей на волнении ΔH_4 , скоростной запас глубины ΔH_5 :

$$\Delta H = \Delta H_1 + \Delta H_2 + \Delta H_3 + \Delta H_4 + \Delta H_5.$$

Для определения перечисленных составляющих ΔH существуют различные методы (табличные, графические, аналитические) базирующиеся на теоретических и экспериментальных данных [1, 2, 4].

На рис. 3 приведены результаты расчёта скорости теплохода "Рени" (проект Р845, типа "Измаил") в условиях ограниченной глубины с учетом просадки по экспериментальным данным [6, 7].

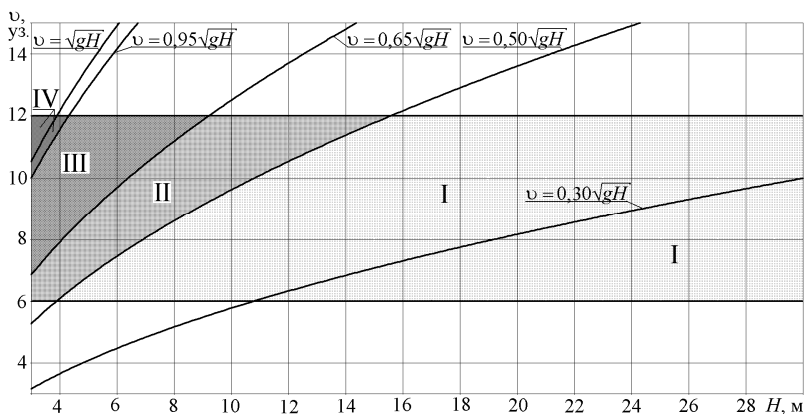


Рис. 3. Зоны влияния мелководья в эксплуатационном диапазоне скоростей теплохода "Рени" ($v_3 = 6 \div 12$ уз.): I – режим движения не отличается от условий неограниченной глубины; II – дополнительный режим на мелководье; III – режим усиленного волнообразования и динамического проседания; IV – критический режим значительного роста сопротивления движению и образования поперечной волны

При этом очевидно (см. рис. 1 и 3), что эксплуатационный диапазон скоростей значительно ниже $v_{кр} = \sqrt{gH}$, и только лишь в диапазоне глубин от 3 до 4 м (минимально допустимая осадка судна кормой $T_{\min} = 3$ м), прохождение судна возможно только в балласте и при некоторых условиях неполной загрузки, где теоретически возможно достижение судном критической скорости.

Анализ рис. 4 – 7 позволяет сделать вывод о достоверности результатов расчета по уточненной для условий ограниченного по глубине фарватера модели. При увеличении скорости и переходе в режим

повышенного волнообразования (зона III на рис. 3) практически линейный характер зависимостей $N_e = f(v, H/T)$ и $R = f(v, H/T)$ изменяется и переходит к виду:

$$R = 28e^{0,26v} \left(\frac{H}{T} \right)^{-0,02v+0,14} ; N_e = 54,25e^{0,36v} \left(\frac{H}{T} \right)^{-0,02v+0,14}.$$

Таким образом, предложены подходы для оценки влияния мелководья на характеристики ходкости морских и речных судов.

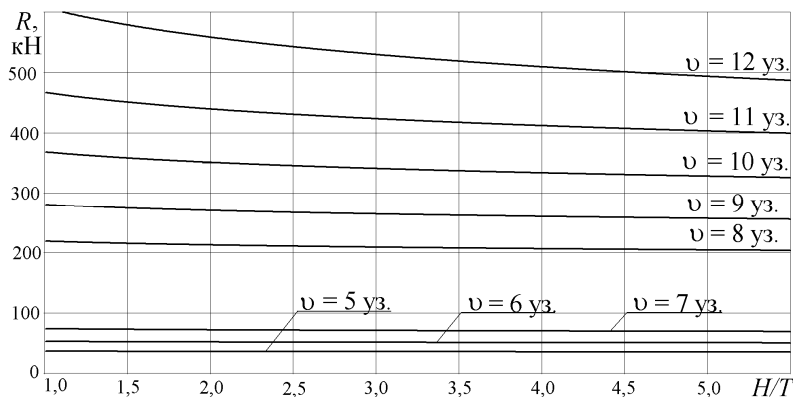


Рис. 4. Зависимость сопротивления R от соотношения H/T (расчетные величины)

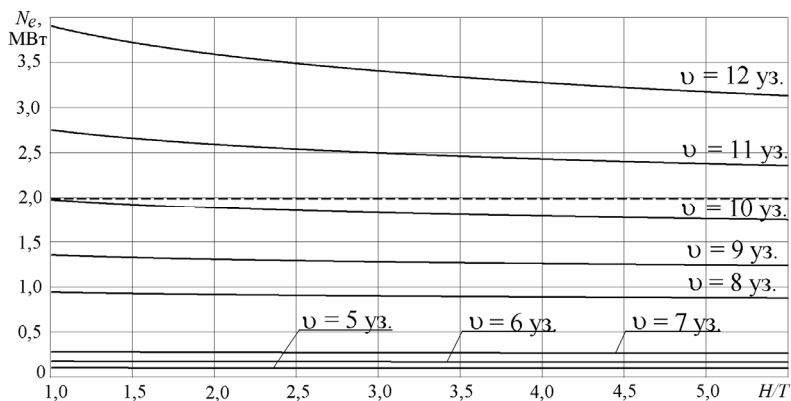


Рис. 5. Зависимость эффективной мощности N_e от соотношения H/T (расчетные величины и экспериментальные данные)

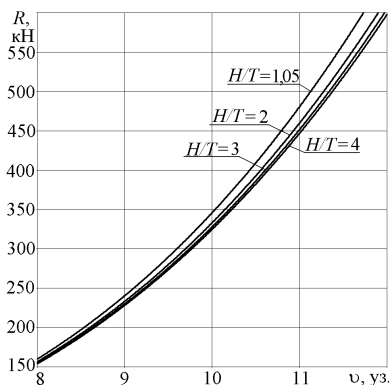


Рис. 6. Зависимость сопротивления R от скорости v теплохода "Рени" при различных значениях H/T (расчетные величины)

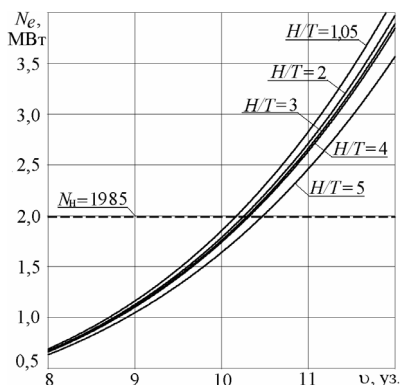


Рис. 7. Зависимость сопротивления N_e от скорости v теплохода "Рени" при различных значениях H/T (расчетные величины)

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Воробьев Ю.Л., Соколов В.Т., Журавицкий Г.Д., Коханов Э.В., Кубачев Н.А., Лабин А.И. К вопросу о навигационных запасах глубины под килем судна при плавании в каналах и на мелководье // Морской транспорт. Серия "Судовождение и связь": экспресс-информация В/О "Мортехинформреклама". - 1986. - Вып. 9(194). - С. 1 - 18.
2. Коханов Э.В., Лабин А.И. Исследование просадки судов, движущихся по мелководному фарватеру // Теория и практика модернизации судов. - М.: ЦРИА "Морфлот", 1981. - С. 15 - 21.
3. Павленко В.Г., Деревянченко Н.Т., Литвинов А.И., Машикова И.Ю. Оптимальный гидромеханический комплекс сухогрузного теплохода для р. Дунай. Отчет о научно-исследовательской работе. - Новосибирск: НИИВТ, 1992. - 101 с.
4. Справочник капитана дальнего плавания / Л.Р. Аксютин, В.М. Бондарь, Г.Г. Ермолаев. - М.: Транспорт, 1988. - 248 с.
5. Суворов П.С. Динамика двигателя в судовом пропульсивном комплексе. - Одесса: ОНМА, 2004. - 304 с.
6. Суворов П.С., Тарасенко Т.В. Прогнозирование влияния нерегулярного волнения на ходкость одновинтового судна // Автоматизация судовых технических средств: научн.-техн. сб. - 2005. - Вып. 10. - Одесса: ОНМА. - С. 76 - 92.
7. Суворов П.С., Тарасенко Т.В., Домбровский В.А. Оценка расхода топлива в судовых условиях // Автоматизация судовых технических средств: научн.-техн. сб. - 2006. - Вып. 11. - Одесса: ОНМА. - С. 78 - 87.