

А.Н. Папир

Водометные движители малых судов

**Москва
«Книга по Требованию»**

УДК 656
ББК 39.1
А11

А11 **А.Н. Папир**
Водометные движители малых судов / А.Н. Папир – М.: Книга по Требованию, 2024. – 256 с.

ISBN 978-5-458-28708-1

В книге изложены (без применения методов высшей математики) физические основы работы водометных движителей малых судов и рассмотрены все основные вопросы, необходимые при расчете, проектировании и изготовлении этих движителей. Даны подробные примеры расчета. Книга предназначена для специалистов, занимающихся разработкой водометных движителей и осевых насосов, студентов соответствующих специальностей и может быть использована широким кругом любителей водно-моторного спорта и туризма.

ISBN 978-5-458-28708-1

© Издание на русском языке, оформление
«YOYO Media», 2024
© Издание на русском языке, оцифровка,
«Книга по Требованию», 2024

Эта книга является репринтом оригинала, который мы создали специально для Вас, используя запатентованные технологии производства репринтных книг и печати по требованию.

Сначала мы отсканировали каждую страницу оригинала этой редкой книги на профессиональном оборудовании. Затем с помощью специально разработанных программ мы произвели очистку изображения от пятен, клякс, перегибов и попытались отбелить и выровнять каждую страницу книги. К сожалению, некоторые страницы нельзя вернуть в изначальное состояние, и если их было трудно читать в оригинале, то даже при цифровой реставрации их невозможно улучшить.

Разумеется, автоматизированная программная обработка репринтных книг – не самое лучшее решение для восстановления текста в его первоизданном виде, однако, наша цель – вернуть читателю точную копию книги, которой может быть несколько веков.

Поэтому мы предупреждаем о возможных погрешностях восстановленного репринтного издания. В издании могут отсутствовать одна или несколько страниц текста, могут встретиться невыводимые пятна и кляксы, надписи на полях или подчеркивания в тексте, нечитаемые фрагменты текста или загибы страниц. Покупать или не покупать подобные издания – решать Вам, мы же делаем все возможное, чтобы редкие и ценные книги, еще недавно утраченные и несправедливо забытые, вновь стали доступными для всех читателей.

ОСНОВНЫЕ УСЛОВНЫЕ ОБОЗНАЧЕНИЯ

Физические свойства жидкости

γ — удельный вес, $\text{кг}/\text{м}^3$
 ρ — плотность, $(\text{кг} \cdot \text{сек}^2)/\text{м}^4$
 ν — кинематический коэффициент вязкости, $\text{м}^2/\text{сек}$
 g — ускорение силы тяжести, $\text{м}/\text{сек}^2$

Сопротивление воды движению корпуса судна и работа двигателя

L, B — длина и ширина площади ватерлинии судна, м
 T — осадка судна, м
 Q — смоченная поверхность корпуса судна, м^2
 V, D — объемное и весовое водоизмещение, м^3
 A_V, A_Q — гидростатическая (Архимедова) и динамическая поддерживающие силы, кг
 $l = \frac{L}{\sqrt[3]{V}}$ — относительная длина судна
 $h, h/T$ — глубина (м) и относительная глубина фарватера
 Re, Fr — коэффициенты динамического подобия — числа Рейнольдса и Фруда
 Q — расход жидкости, $\text{м}^3/\text{сек}$
 F — площадь живого (поперечного) сечения потока, м^2
 $v = Q/F$ — средняя скорость жидкости, $\text{м}/\text{сек}$
 v_0 — скорость движения судна относительно воды, $\text{м}/\text{сек}$
 v, w — скорости — абсолютная и вызванная работой двигателя
 $v_{\text{вых}}$ — средняя скорость в струе на выходе из двигателя относительно корпуса судна, $\text{м}/\text{сек}$
 R — сила сопротивления воды движению корпуса судна, кг
 R_f, R_d, R_k, R_w — сопротивления: трения, давления, формы и волновое, кг
 R_s — суммарное сопротивление, зависящее от вязкости жидкости, кг
 $R_{\text{ост}}$ — остаточное сопротивление, кг
 ζ — коэффициент полного сопротивления (гидравлических потерь)
 $\zeta_f, \zeta_k, \zeta_w$ — коэффициенты сопротивления трения, формы и волнового
 $\Delta\zeta_f, \Delta\zeta_k$ — надбавки к коэффициентам сопротивления трения и формы, учитывающие шероховатость и выступающие части корпуса
 η_i, η — идеальный и действительный к. п. д. двигателя
 N_e — мощность на валу двигателя, л. с.

P, P_e — упор и движущая сила, развиваемые двигателем, $\kappa\Gamma$
 τ_{pi} — коэффициент нагрузки идеального двигателя по упору
 α, β — коэффициенты взаимодействия двигателя с корпусом судна
 $K = 1 + \Sigma_{гир}$ — суммарный коэффициент гидравлических потерь в водометной трубе, приведенный к выходной скорости
 $q = v_{вых}/v_0$ — коэффициент скорости

Работа насоса

E — полная удельная энергия потока жидкости, м вод. ст.
 $H, H_T = H/\eta_r$ — напор и теоретический напор насоса, м вод. ст.
 $N_{п}, N$ — полезная и полная (потребляемая) мощность, л. с.
 v, ω, u — средние значения абсолютной, относительной и переносной (при вращательном движении) скорости жидкости, м/сек
 $1, 2, u, z, \infty$ — индексы при скорости соответственно: вход и выход из рабочего колеса, проекции на окружное и осевое направления, среднегеометрическая относительная скорость
 Γ — циркуляция скорости, $\text{м}^2/\text{сек}$
 R, P — подъемная сила, действующая на профиль со стороны жидкости и со стороны профиля на жидкость, $\kappa\Gamma$
 Y, X — подъемная сила и лобовое сопротивление, $\kappa\Gamma$
 C_y, C_x — коэффициенты подъемной силы и силы сопротивления
 $t = \frac{2\pi r}{Z}$ — шаг решетки профилей, расположенной на радиусе $r, \text{м}$
 Z — число лопастей рабочего колеса или лопаточного отвода
 i, δ — аэродинамический и геометрический углы атаки, радиан (град.)
 ω — угловая скорость вращения колеса, л/сек
 n, n_c — число оборотов колеса, об/мин, об/сек
 $\eta, \eta_r, \eta_m, \eta_{об}$ — к. п. д. насоса: полный, гидравлический, механический, объемный
 α, β — углы установки профиля в решетке и его кривизны
 D — номинальный диаметр рабочего колеса насоса, равный внутреннему диаметру его камеры
 $K_l = D_n/D_m$ — масштаб моделирования — отношение линейных размеров натурального и модельного насосов
 K_n, K_Q, K_N — коэффициенты напора, подачи и мощности насоса
 n_s — коэффициент быстроходности насоса
 $p_a/\gamma, p_d/\gamma$ — атмосферное давление и давление насыщения (парообразования) м вод. ст.
 H_{sv} — избыточный напор всасывания, м вод. ст.
 $\sigma = H_{sv}/H$ — кавитационный коэффициент
 C — кавитационный коэффициент быстроходности
 H_s — геометрическая высота всасывания, м
 φ — коэффициент запаса (для определения допустимой высоты всасывания и допустимого числа оборотов)
 φ — угол поворота лопастей рабочего колеса от расчетного ($\varphi=0^\circ$) положения, град.

- λ, ζ — коэффициенты гидравлических потерь трения и местного сопротивления
 $h, \bar{h} = h/H_T$ — абсолютная (м вод. ст.) и относительная величина гидравлических потерь
 l — длина профиля, м
 $l/t, T_0 = t/l$ — густота и относительный шаг решетки профилей
 $d_m, d_m/l$ — абсолютное (м) и относительное значение максимальной толщины профиля
 r, r^*, r^{**} — радиусы соответственно: расположения решетки профилей, закругления входной и выходной кромок профиля, м, мм
 M — изгибающий момент, действующий на лопасть рабочего колеса, кг·см
 u, z, x, y — индексы при M , обозначающие проекцию изгибающего момента на соответствующие оси
 $\sigma_{изг}, \sigma_{цб}, \sigma_{max}$ — максимальные напряжения в лопасти рабочего колеса соответственно от изгиба, центробежной силы и суммарные, кг/см²
 $n_{кр}$ — критическое число оборотов вала, об/мин
 Остальные редко встречающиеся условные обозначения поясняются в тексте

Глава 1. ВОДОМЕТНЫЙ ДВИЖИТЕЛЬ И ЕГО ЭЛЕМЕНТЫ

§ 1. ПРИНЦИП ДЕЙСТВИЯ

Движение судна с постоянной скоростью совершается под действием движущей силы, равной по величине силе сопротивления воды (и воздуха) движению корпуса судна.

Движущая сила обеспечивается судовым двигателем. Реактивным судовым двигателем называют устройство, которое захватывает воду из окружающего судно пространства и отбрасывает ее с увеличенной скоростью в сторону, обратную направлению движения судна. Реакция отбрасываемой назад струи жидкости и является движущей силой.

Принцип действия реактивного судового двигателя рассмотрим на примере работы самого простого движителя — гребного весла. Положим, что лодка с веслами плывет на глубокой воде в бесконечном удалении от берегов, и на механическую систему лодка — вода не действуют никакие внешние силы. Сумма внешних сил и изменение количества движения этой системы равны нулю. Следовательно, количество движения лодки равно количеству движения воды, отбрасываемой назад веслами,

$$m_1 v_1 = m_2 v_2$$

где m_1 и v_1 — масса и скорость лодки;

m_2 и v_2 — масса и скорость отбрасываемой воды.

Так как очевидно, что масса лодки всегда больше массы отбрасываемой воды, определяемой площадью весел, то скорость воды всегда должна быть больше, чем скорость хода лодки, $v_2 > v_1$. Это основной закон работы любого реактивного судового движителя.

Основными типами реактивных судовых движителей являются гребные винты, гребные колеса, крыльчатые и водометные движители. Так как водометный движитель целиком расположен внутри корпуса судна, то жидкость, проходящая через движитель, должна входить в приемное отверстие в корпусе судна и выбрасываться движителем через выходное отверстие

Принципиальную разницу в величине реакции при входе и выходе жидкости показал Н. Е. Жуковский [16]. Реакция входящей жидкости примерно в 100 раз меньше выходящей при одинаковых площадях отверстий.

Разница в величине реакции при входе и выходе является следствием различного характера течения жидкости. При входе в отверстие жидкость подтекает к нему со всех сторон с непрерывным распределением скоростей по всему жидкому объему. По вытеканию образуется струя (по выражению Н. Е. Жуковского «луч») жидкости.

За последние 100—150 лет во многих странах зарегистрированы сотни изобретений различных водометных движителей. Этот поток изобретений не оскудевает и сейчас [12, 13, 29, 36]. Одновременно создавалась и единая теория работы движителей, начало которой было положено исследованиями Н. Е. Жуковского [16, 17]. Дальнейшее развитие теории отражено в ряде отечественных работ [4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 24, 29, 34, 40, 41, 42].

§ 2. СОПРОТИВЛЕНИЕ ВОДЫ ДВИЖЕНИЮ КОРПУСА [2, 6, 28]

Ходовые (навигационные) качества водоизмещающего — плавающего на поверхности воды — судна в значительной степени определяются формой его корпуса, которая обычно задается теоретическим чертежом. Внешняя поверхность корпуса изображается в проекциях на три взаимно перпендикулярные плоскости:

- диаметральною (ДП) — вертикальную плоскость, проходящую вдоль корпуса посередине ширины и разделяющую его на две симметричные части (правый и левый борт);

- плоскость мидель-шпангоута — вертикальную поперечную плоскость, проходящую посередине длины корпуса и разделяющую его на носовую и кормовую части;

- плоскость грузовой ватерлинии (ГВЛ) — совпадающую с поверхностью воды в спокойном состоянии при нормально нагруженном корпусе, разделяющую его на подводную и надводную части.

Основные размерения подводной части корпуса следующие: длина L — максимальная длина ватерлинии (линии сечения корпуса плоскостью ГВЛ); ширина B — максимальная ширина ватерлинии; осадка T — максимальное расстояние поверхности подводной части корпуса от плоскости ГВЛ. Объем подводной части корпуса V называют объемным водоизмещением судна, а вес воды в этом объеме $D = \gamma V$ — весовым или просто водоизмещением судна. Степень остроты обводов корпуса опре-

деляют различными коэффициентами полноты, основной из которых коэффициент общей полноты корпуса

$$\delta = \frac{V}{LBT}. \quad (1.1)$$

На смоченную поверхность корпуса, величину которой обозначают Ω , со стороны воды действуют силы. При неподвижном судне это силы гидростатического давления. Их равнодействующая A_v — Архимедова поддерживающая сила — направлена вертикально вверх. При прямолинейном равномерном движении судна со скоростью v на смоченную поверхность действуют две категории сил: перпендикулярные (силы нормального

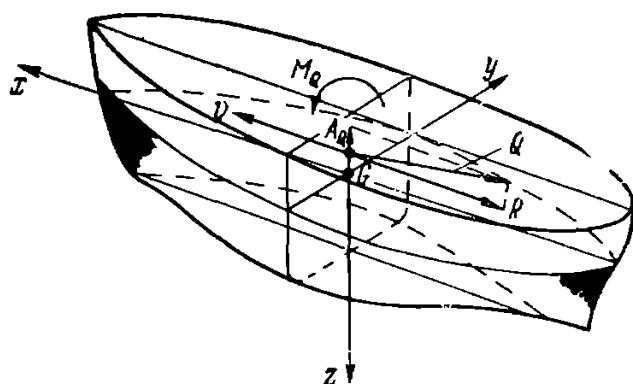


Рис. 1. Схема гидродинамических сил, действующих на подводную часть корпуса при равномерном поступательном движении.

давления) и касательные (силы трения). Сумма всех этих сил в общем случае может быть сведена к главному вектору (равнодействующей силе) Q , приложенному в центре тяжести G и лежащему в ДП, и к паре сил, составляющих главный момент этих сил M_Q , действующий в этой же плоскости (рис. 1).

Сила Q может быть разложена на направление движения судна и перпендикулярное ему —

вертикальное. Первую проекцию R называют силой сопротивления воды движению корпуса судна (или, кратко, сопротивлением воды); вторую A_Q — гидродинамической поддерживающей силой. Она вызывает изменение средней осадки судна на ходу (всплытие или погружение). Момент M_Q вызывает дифферент, т. е. изменение погружения носа или кормы судна по сравнению с положением плавания при неподвижном корпусе.

В зависимости от соотношения гидростатических (Архимедовых) и гидродинамических сил, действующих на смоченную поверхность корпуса, изменяется режим движения судна. По мере роста скорости хода и, следовательно, силы A_Q и момента M_Q режим движения судна по поверхности воды изменяется от плавания к глиссированию (скольжению судна по поверхности). При этом корпус судна располагается над свободной поверхностью, касаясь ее только частью днища.

Переход на режим глиссирования возможен у любого судна, однако, у обычных судов для достижения требуемой высокой скорости необходимо затрачивать неосуществимо большую мощ-

ность. Для облегчения перехода на режим глиссирования выполняют специальные обводы корпуса судна. Однако и в этих условиях не все катера достигают режима чистого глиссирования, при котором гидродинамическая поддерживающая сила A_Q равна весовому водоизмещению. Катера, работающие в переходных режимах, называют полуглиссирующими.

Характер распределения гидродинамических сил по поверхности корпуса и, особенно сил сопротивления воды, сложен и пока не поддается теоретическому определению. Поэтому величины сил сопротивления находят экспериментально. Для правильной постановки опытов и обобщения их результатов необходимо соблюдать динамическое подобие. Два сравниваемых геометрически подобных потока жидкости динамически подобны, если отношения одноименных сил, действующих в соответственных точках потоков, остаются постоянными.

Для характеристики динамического подобия потоков применяют безразмерные критерии (числа) подобия. При обтекании корпуса судна наибольшее значение имеют силы вязкого трения жидкости и силы тяжести. Подобие этих сил характеризуют двумя критериями динамического подобия: числами Рейнольдса Re и Фруда Fr .

Число Рейнольдса

$$Re = \frac{vL}{\nu} \quad (1.2)$$

характеризует отношение сил инерции к силам вязкости, а число Фруда

$$Fr = \frac{v}{\sqrt{gL}} \quad (1.3)$$

— отношение сил инерции к силам тяжести.

Здесь v — скорость хода, $м/сек$;

L — длина судна по действующей ватерлинии, $м$;

g — $9,81 м/сек^2$ — ускорение силы тяжести;

ν — кинематический коэффициент вязкости воды, $м^2/сек$.

Число Фруда в виде (1.3) используют для водоизмещающих судов, у которых длина судна L практически не зависит от скорости хода. Для этих судов число Фруда изменяется в пределах $0,05 \div 0,65$. Нижний предел — для тихоходных судов (буксируемых барж), верхний — для быстроходных катеров.

Для глиссирующих судов длина L по действующей ватерлинии существенно зависит от скорости хода. В этих случаях число Фруда применяют в виде

$$Fr_D = \frac{v}{\sqrt{g \sqrt[3]{V_0}}} \quad (1.4)$$

где V_0 — объемное водоизмещение неподвижного корпуса.

Тогда $F_{гД} < 1$ соответствует режиму плавания, $1 < F_{гД} < 3$ — переходному режиму и $F_{гД} > 3$ — глиссированию. Следовательно, для перехода на режим глиссирования необходимо, чтобы

$$v > 3 \sqrt[3]{g V_0}. \quad (1.5)$$

Мелкие суда работают при режимах чистого глиссирования и число $F_{гД}$ составляет от 3 до 10 и выше.

Условие установившегося (равномерного) поступательного движения самоходного судна можно записать выражением

$$\Sigma P_e = R, \quad (1.6)$$

где ΣP_e — суммарная движущая сила (полезная тяга), развиваемая движителями судна.

Следовательно, при проектировании движителей самоходного судна необходимо знать силу сопротивления воды движению его корпуса.

Не вдаваясь в подробности [2, 6], отметим, что в общем виде сопротивление воды движению корпуса судна складывается из сопротивлений трения, формы и волнового.

Широко применяется разделение полной величины сопротивления на сопротивление трения и остаточное

$$R = R_f + R_o. \quad (1.7)$$

Величину R_f определяют как сопротивление пластины, движущейся параллельно своей поверхности, качество которой аналогично качеству поверхности корпуса, а величина равна смоченной поверхности Ω .

Обычно величину полного сопротивления определяют с помощью буксировочных испытаний и называют буксировочным сопротивлением. Величину R_f подсчитывают, а R_o находят как разность между буксировочным и сопротивлением трения.

Из рис. 2 можно ориентировочно оценить соотношение сопротивления трения и остаточного, если полное принято за 100%.

Для расчета величины полного сопротивления воды движению водоизмещающих судов принимают формулу, аналогичную общей формуле гидравлического сопротивления (гидравлических потерь)

$$R = \zeta \frac{\rho v^2}{2} \Omega, \quad (1.8)$$

где ρ — плотность воды, $(\text{кг} \cdot \text{сек}^2)/\text{м}^4$;

ζ — безразмерный коэффициент полного сопротивления воды.

Все сказанное относится к сопротивлению так называемого голого корпуса. Необходимо, кроме того, учитывать сопротив-

ление выступающих частей, к которым относят все конструктивные детали на подводной поверхности судна, нарушающие плавность очертания корпуса: судовые рули, вертикальные и боковые кили и др. Выходы гребных валов, представляющие значительное сопротивление (до 8% от сопротивления голого корпуса), в водометных судах отсутствуют.

Увеличение сопротивления от наличия выступающих частей обычно учитывают добавкой к коэффициенту сопротивления формы

$$\zeta'_k = \zeta_k + \Delta\zeta_k, \quad (1.9)$$

где ζ_k — коэффициент сопротивления формы корпуса с учетом влияния выступающих частей.

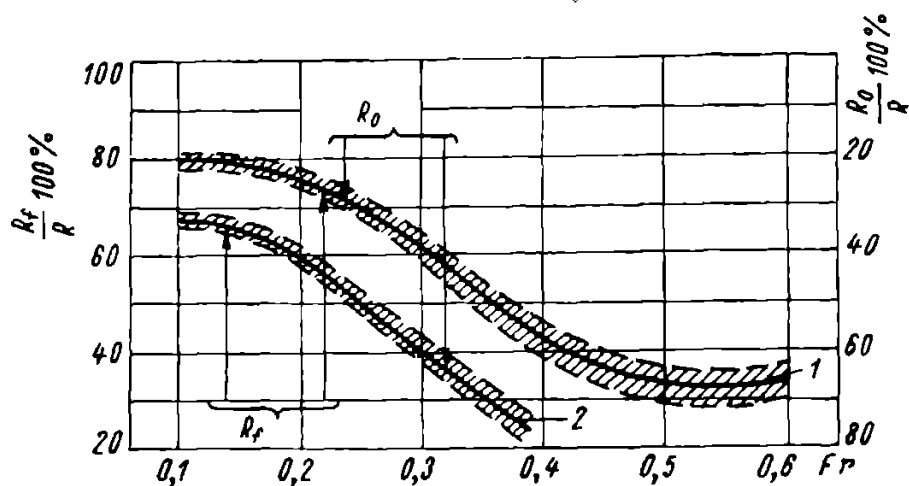


Рис. 2. К определению соотношения между составляющими сопротивления трения и остаточным.

1 — пассажирские суда ($Fr < 0,4$) и водонзмещающие катера ($Fr > 0,5$); 2 — буксирные и рыболовные суда ($Fr < 0,4$).

Надбавка $\Delta\zeta_k$ у рационально спроектированных судов составляет $(0,1—0,2) \cdot 10^{-3}$. У водометных судов без судового руля и килей при гладком (например, пластмассовом) корпусе может быть $\Delta\zeta_k \approx 0$ (обычно руль, входящий в реверсивно-рулевое устройство движителя, не относят к выступающим частям).

При движении судна, кроме сопротивления воды, имеет место и сопротивление воздуха. Абсолютная величина воздушного сопротивления для судов, движущихся при отсутствии ветра или при ветре с силой до двух баллов (2—3 м/сек), незначительна и обычно составляет 2—4% от полного сопротивления воды движению судна.

Возникновение волн и волнового сопротивления при движении судна по поверхности воды обусловлено в основном дейст-

вием сил тяжести и инерции. Величина коэффициента волнового сопротивления зависит от размеров корпуса и формы его подводной части, особенно в оконечностях.

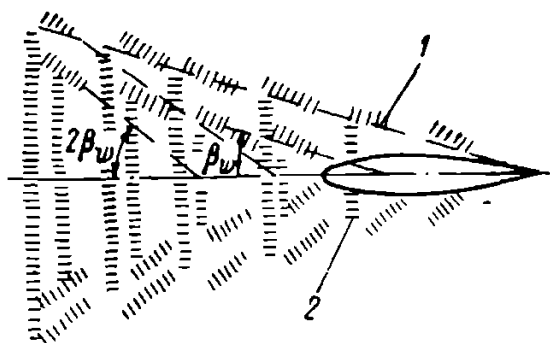


Рис. 3. Характер судовых волн на глубокой воде.
1 — гребни расходящихся волн; 2 — гребни поперечных волн $2\beta_w \approx 36^\circ \div 40^\circ$.

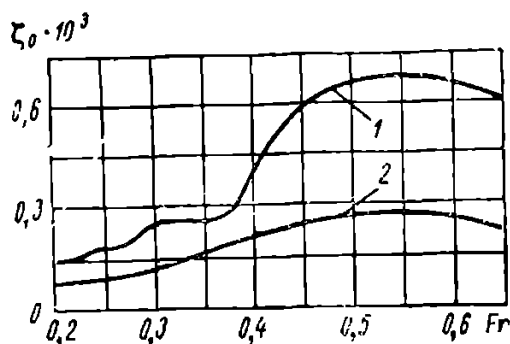


Рис. 4. Характерные кривые коэффициентов остаточного сопротивления для судов с полными (1) и острыми (2) обводами.

На величину волнового сопротивления существенно влияют также условия плавания судна — ограничения фарватера по глубине и ширине.

Величина волнового сопротивления при плавании на неограниченном фарватере может быть оценена по формуле вида

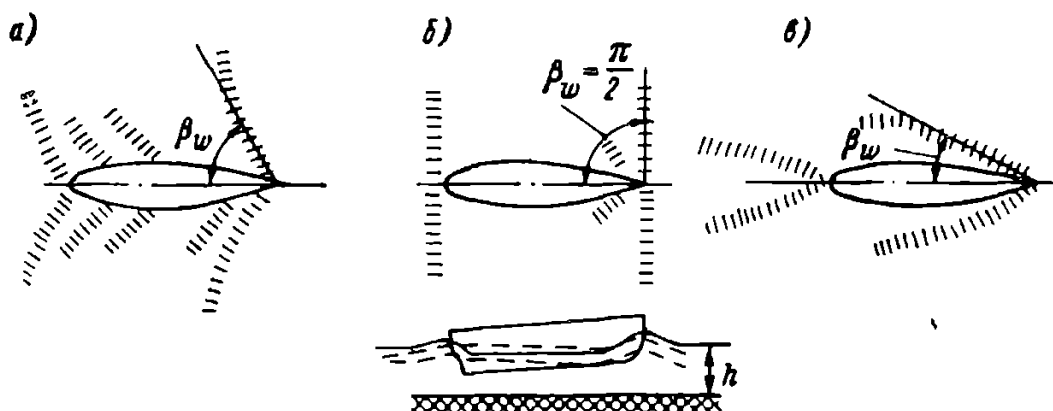


Рис. 5. Изменение характера судовых волн на мелководье: а — докритическая скорость хода; б — критическая; в — закритическая.

(1.8) и коэффициенту ζ_w . Однако, как правило, волновое сопротивление включают в состав остаточного сопротивления R_o , которое определяют по результатам модельных или натурных буксировочных испытаний (см. § 21).

Волновое сопротивление существенно связано со скоростью хода судна и характером картины волнообразования. При движении судна основными центрами волнообразования являются