

ПЛАВАНИЕ НА МЕЛКОВОДЬЕ И В УЗКОСТИ

В. Ган несен

учебное пособие для судоводителей

Содержание

Введение

1. Влияние мелководья на движущееся судно
 - 1.1. Скоростное проседание
 - 1.1.1. Формулы института гидрологии и гидротехники АН СССР для среднетоннажных судов (формулы Г.И.Сухомела)
 - 1.1.2. Формулы, рекомендуемы НШС МРХ
 - 1.1.3. Формула А.П.Ковалева
 - 1.1.4. Графический метод NPL
 - 1.1.5. Универсальный метод Ремиша
 - 1.2. Влияние мелководья на скорость движения судна. Критическая скорость.
 - 1.3. Управляемость и инерционные характеристики судна на мелководье и в узкости
 - 1.4. Влияние рельефа канала на поведение судна. Расхождение судов в канале
2. Расчет безопасных параметров движения судна при прохождении мелководья
 - 2.1. Расчет проходной осадки судна
 - 2.1.1. Навигационный запас
 - 2.1.2. Волновой запас
 - 2.1.3. Увеличение осадки от крена
 - 2.1.4. Изменение осадки при изменении плотности воды
 - 2.2. Расчет безопасной скорости
 - 2.3. Возникновение спутной волны
 - 2.4. Определение ограничивающих изобат

ВВЕДЕНИЕ

Плавание на мелководье является одним из наиболее сложных условий, в которых оказывается судно в процессе эксплуатации. И сложность ситуации заключается не только в том, что малый запас воды под килем в данных условиях представляет собой реальную навигационную опасность, но и в том, что поведение судна на мелководье существенно отличается от поведения на глубокой воде.

К основным отличительным особенностям поведения судна на мелководье можно отнести ухудшение управляемости, увеличение тормозного пути, дополнительное проседание с изменением посадки и падение скорости при тех же энергетических затратах.

Еще более сложным управление судном становится при плавании на мелководье с ограниченной акваторией (проливы, каналы), где на поведение судна влияют как берега, так и другие суда.

Незнание или пренебрежение особенностями поведения судна на мелководье нередко приводит к

аварии.

1. ВЛИЯНИЕ МЕЛКОВОДЬЯ НА ДВИЖУЩЕЕСЯ СУДНО

Понятие “**мелководье**” относительно. Влияние мелководья на поведение судна зависит не только от глубины моря, но и от габаритов судна и его скорости. Существуют различные эмпирические формулы для определения глубины, с которой начинает сказываться мелководье. Согласно одной из формул [1] влияние мелководья на поведение судна наблюдается на глубинах:

$$H_{zl} < 4d + \frac{3V_c^2}{g} \quad (1)$$

где H_{zl} - глубина, м;

d - средняя осадка судна, м;

V_c - скорость судна, м/с;

g - ускорение свободного падения, 9.81 м/с^2 .

Другим критерием оценки влияния мелководья, связанным с изменением картины волнообразования, является “число Фруда” по глубине:

$$Fr_H = \frac{V_c}{g * H_{zl}} \quad (2)$$

Согласно этому критерию ошутимое влияние мелководья начинает проявляться при $Fr_H > 0.4 - 0.5$.

1.1. СКОРОСТНОЕ ПРОСЕДАНИЕ

Термин “**скоростное проседание**” обозначает разность между глубинами под килем движущегося судна и судна, не имеющего хода относительно воды.

Причиной скоростного проседания судна является следующий физический процесс, происходящий вокруг движущегося судна.

При рассмотрении движения судна относительно воды можно в равной степени говорить о движении воды относительно судна. Таким образом, частицы воды, встречающие на своем пути корпус судна, вынуждены его огибать вдоль бортов и днища (рис.1).

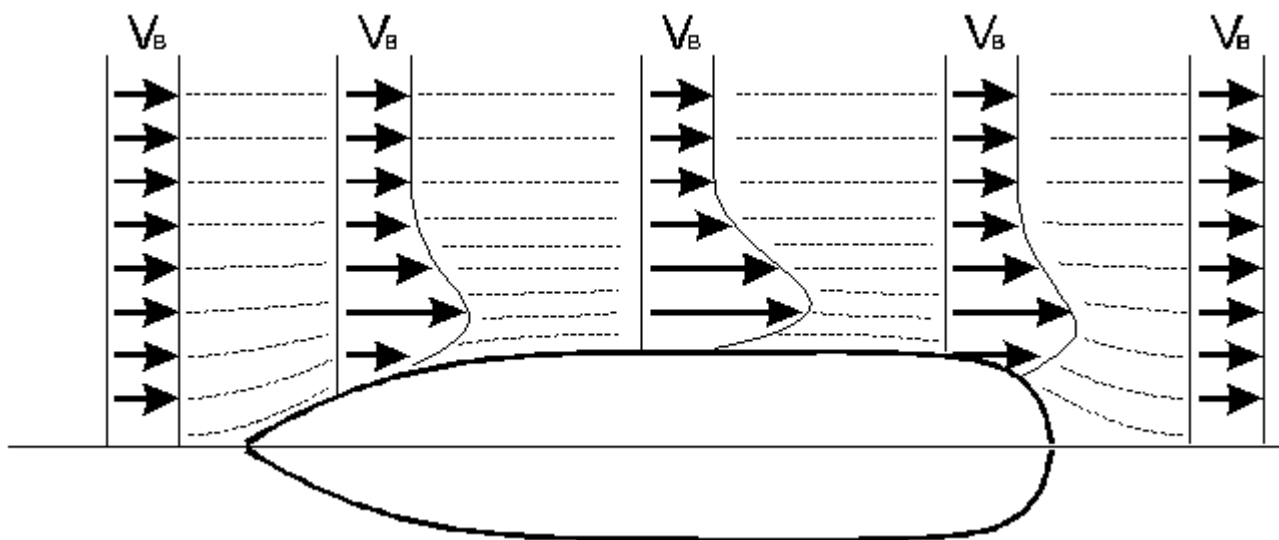


Рис.1

Поскольку вода обладает свойством неразрывности, то вытесняемые в стороны частицы воды, двигаясь по криволинейной траектории, за то же самое время должны пройти больший путь чем частицы, движущиеся по прямой. Следовательно, скорость частиц, огибающих судно, выше скорости частиц, движущихся по прямой. Кроме того, эти частицы, находившиеся в состоянии покоя относительно грунта, образуют поток, движущийся относительно грунта в направлении, встречном направлению движения судна.

Зависимость между скоростью потока жидкости и давлением жидкости на данном участке описывается уравнением Бернулли:

$$\frac{P}{\gamma} + \frac{V_g^2}{2g} = \mathit{const} \quad , \quad (3)$$

где P - давление жидкости на данном участке;

g - плотность жидкости;

V_g - скорость потока.

Из выражения (3) видно, что если на каком либо участке скорость движения жидкости увеличивается, то для сохранения равенства должно понизиться давление.

Следовательно, во время движения судна, чтобы выражение (3) сохранялось, вокруг судна происходит падение давления, а следовательно, и уровня воды (рис.2).

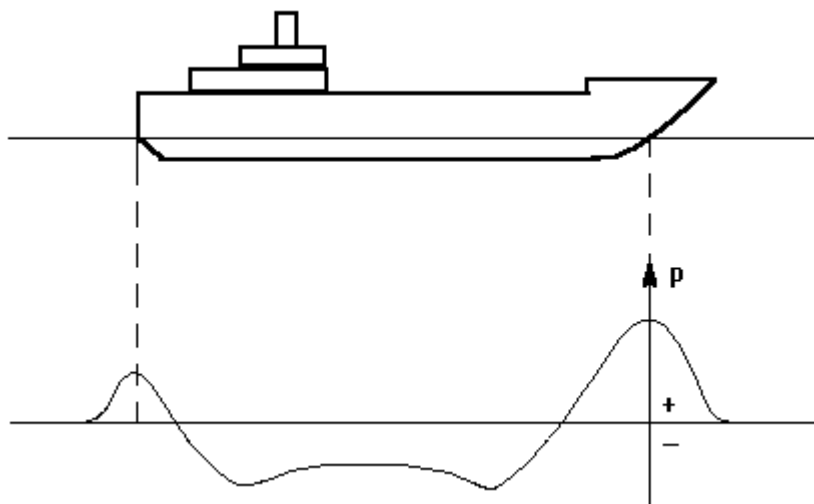


Рис.2

Это и является причиной скоростного проседания судна. Из выражения (3) видно, что чем больше скорость потока, движущегося вдоль корпуса судна, тем больше падает давление, и тем значительнее проседание судна.

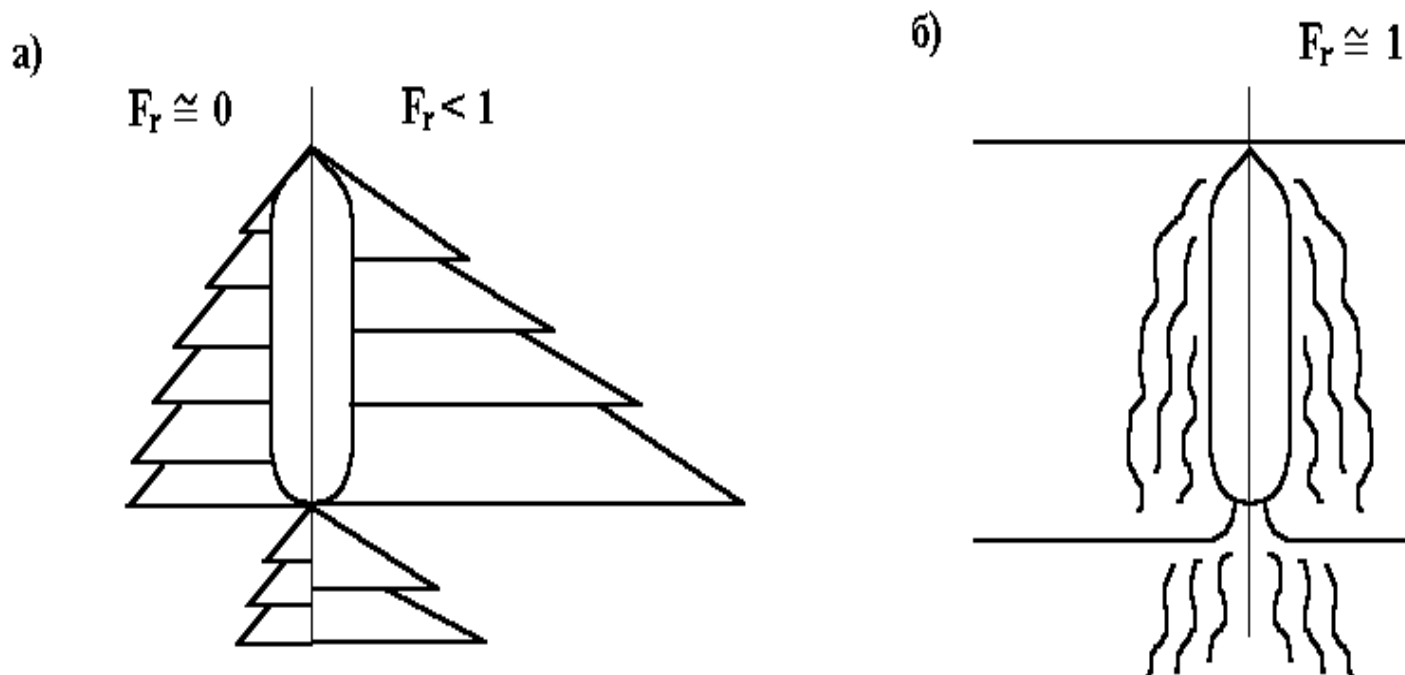
Поле вызванных скоростей не симметрично относительно миделя, следовательно, не симметрично и поле давления воды вдоль движущегося судна (рис.2). В носовой части формируется поле повышенного давления за счет лобового сопротивления формы корпуса, замедляющего набегающий поток. В кормовой части замедление потока, огибающего судно, (а следовательно, и повышение давления) происходит за счет влияния “попутного потока”, движущегося вместе с судном. Однако, работа винта, создающего дополнительное разрежение воды у кормовой оконечности, существенно влияет на результирующую величину поля давлений.

Участки повышенного давления в носовой и кормовой оконечностях имеют разную природу и разные величины, зависящие от многих параметров погруженной части корпуса. Несимметричность поля давления вдоль корпуса приводит к тому, что скоростное проседание происходит с изменением дифферента судна. Для большинства судов, имеющих обычную конфигурацию корпуса (без носового бульба), характерно проседание с дифферентом на корму.

Скоростное проседание с дифферентом на нос характерно для крупнотоннажных судов. Результаты натурных испытаний показывают, что у судов с коэффициентом общей полноты $C_g \geq 0.8$ проседание носовой оконечностью больше, чем кормовой.

При выходе судна на мелководье скоростное проседание увеличивается в сравнении с проседанием на глубокой воде. Причин тому несколько. Одной из причин является меняющаяся картина волнообразования (рис.3). В общем случае движущееся судно образует две системы волн: поперечную, распространяющуюся перпендикулярно диаметральной плоскости судна, и систему волн, образующую сектор (рис.3, а).

Ширина волнового сектора зависит от значения Fr . На мелководье, по мере приближения скорости судна к критическому значению, угол между ДП судна и фронтом расходящихся волн увеличивается. При достижении скорости судна значения, близкого к критическому ($Fr \approx 1$), обе системы волн вырождаются в две поперечные волны - носовую и кормовую (рис.3, б)



Образовавшиеся поперечные волны имеют значительную амплитуду. У судов с обычными обводами корпуса носовая волна располагается под носовой оконечностью, а кормовая волна - несколько позади кормовой оконечности. Это приводит к тому, что носовая оконечность всплывает на волне с увеличением дифферента на корму.

Другой причиной дополнительного проседания судна на мелководье является малый запас воды под килем. Как уже говорилось, частицы воды, огибающие корпус, движутся с большей скоростью, образуя поле вызванных скоростей (встречный поток). Если поле вызванных скоростей достигает грунта, то там возникает пограничный слой, где силы трения притормаживают встречный поток воды (рис. 4).

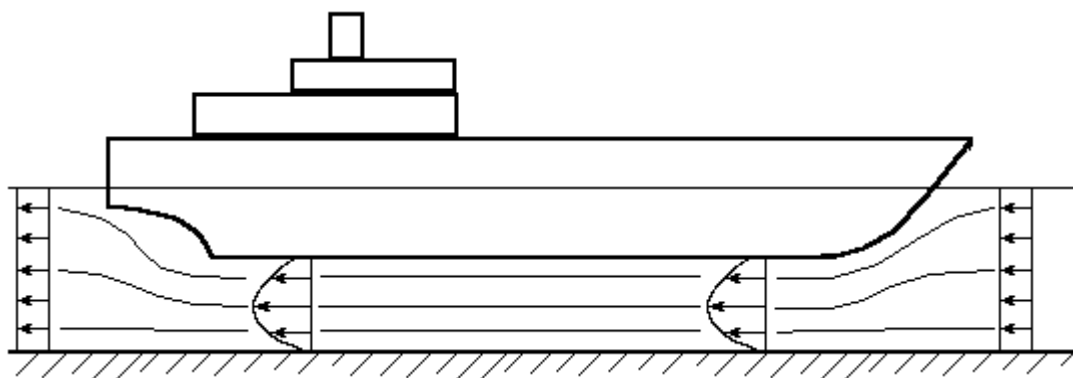


Рис.4

Но для того, чтобы то же количество воды успевало проходить под днищем, скорость потока увеличивается. А увеличение скорости потока под днищем приводит к дополнительному падению давления в этом районе, что и приводит к дополнительному проседанию корпуса.

При движении судна на мелководье с ограниченной акваторией (в узкости) на поле вызванных скоростей оказывают влияние не только дно, но и стенки канала. В результате этого воздействия перепады поля давлений вокруг судна имеют большую амплитуду, чем в условиях неограниченной акватории. Дополнительное падение давления приводит к дополнительному проседанию.

Четкой границы между мелководьем с неограниченной и ограниченной акваторией нет. Дополнительным параметром при оценке поведения судна в мелководном канале служит отношение Ω_k / Ω_∞ , где Ω_k - площадь поперечного сечения канала, а Ω_∞ - площадь поперечного сечения

погруженной части мидель-шпангоута. Ощутимое влияние узкости на проседание начинает сказываться при $\Omega_k / \Omega_\infty \leq 12$.

Для расчета скоростного проседания судна на мелководье существует целый ряд эмпирических формул, дающих порой существенно отличающиеся результаты. Рассмотрим лишь некоторые из этих формул.

1.1.1. Формулы института гидрологии и гидротехники АН СССР для среднетоннажных судов (формулы Г.И.Сухомела)

Проседание средней части судна находится из выражения:

$$\left. \begin{aligned} \Delta d_{cp} &= \frac{(K^2 - 1) * V_c^2}{2g} & \text{при} & \frac{H_{zn}}{d} \leq 1.4 \\ \Delta d_{cp} &= \sqrt{\frac{d}{H_{zn}}} \frac{(K^2 - 1) * V_c^2}{2g} & \text{при} & 1.5 \leq \frac{H_{zn}}{d} \leq 1.4 \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

где Δd_{cp} - проседание средней части корпуса судна, м;

K - коэффициент, зависящий от соотношения длины судна L к его ширине B (табл.1) ;

V_c - скорость движения судна, м/с.

Таблица 1

L/B	4	5	6	7	8	9	12
K		1.32	1.23	1.19	1.17	1.15	1.1

Проседание кормы в этом случае находится по формуле:

$$\Delta d_k = \alpha * \Delta d_{cp} \quad (5)$$

где α - коэффициент, зависящий от соотношения длины судна L к его ширине B (табл.2).

Таблица 2

L/B	3.5 - 5.0	5.0 - 7.0	7.0 - 9.0
α	1.5 - 1.25	1.25 - 1.1	1.1

К сожалению, разработчики метода не указывают, какую длину следует учитывать. Наиболее логичным представляется использовать в расчетах длину судна по действующей ватерлинии.

Так как фактическое соотношение L/B довольно редко принимает табличные значения, то определение коэффициентов K и α линейной интерполяцией при нелинейности этих функций вводит некоторую погрешность в конечный результат. Для решения этой проблемы предлагается график, построенный на основании таблиц 1 и 2 (рис.5).

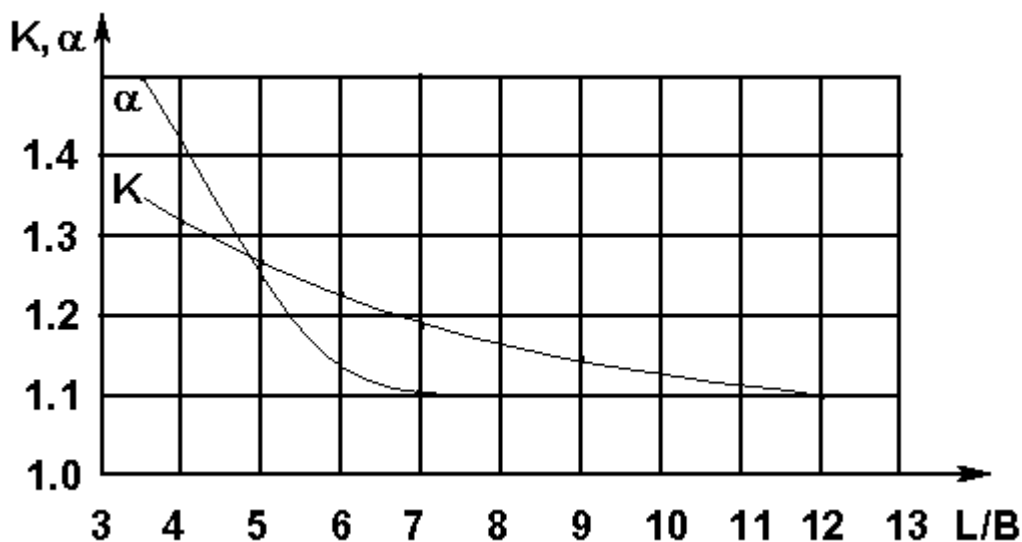


Рис.5

1.1.2. Формулы, рекомендуемые НШС МРХ

Увеличение осадки судна кормой (в м) находится из выражения:

$$\Delta d = K (0.1 * V_c)^2 \quad \text{при} \quad H_{зл}/d \leq 1.4 \quad (6)$$

где K - коэффициент, зависящий от L/B (табл.3);

V_c - скорость движения судна, уз.

Таблица 3

L/B	6	7	8	9
K	0.76	0.62	0.54	0.47

1.1.3. Формула А.П.Ковалева

Для учета скоростного проседания (в см) А.П.Ковалевым были преобразованы формулы Г.И.Сухомела:

$$\left. \begin{aligned} \Delta d_k &= K * V_c^2 & \text{при} & \quad \frac{H_{зл}}{d} \leq 1.4 \\ \Delta d_{cp} &= K * V_c^2 \sqrt{\frac{d_{cp}}{H_{зл}}} & \text{при} & \quad 1.5 \leq \frac{H_{зл}}{d} \leq 4 \end{aligned} \right\} (7)$$

где V_c - скорость движения судна, уз;

K - коэффициент, зависящий от L/B (табл.4).

Таблица 4

L/B	4	5	6	7	8	9
K	1.35	1.03	0.80	0.62	0.55	0.48

Как уже говорилось выше, при плавании на мелководье с ограниченной акваторией у судна появляется дополнительное проседание. Величину дополнительного проседания можно приблизительно вычислить по преобразованной формуле А.П.Ковалева [5] :

$$\Delta d'_k = K' * V_c^2 \quad (8)$$

где $\Delta d'_k$ - величина дополнительного проседания, см;

K' - коэффициент, зависящий от соотношения площадей поперечного сечения канала ω_k и подводной части мидель-шпангоута ω_{\otimes} (табл.5);

V_c - скорость судна, уз.

Таблица 5

$\omega_k / \omega_{\otimes}$	3	4	5	6	8	10	12
K'	0.98	0.61	0.44	0.35	0.24	0.18	0.15

Из таблицы видно, как быстро увеличивается проседание судна при уменьшении поперечного сечения канала. Поскольку зависимость K' от $\omega_k / \omega_{\otimes}$ нелинейная, то для повышения точности нахождения величины K' предлагается график (рис.6), построенный на табличных данных.

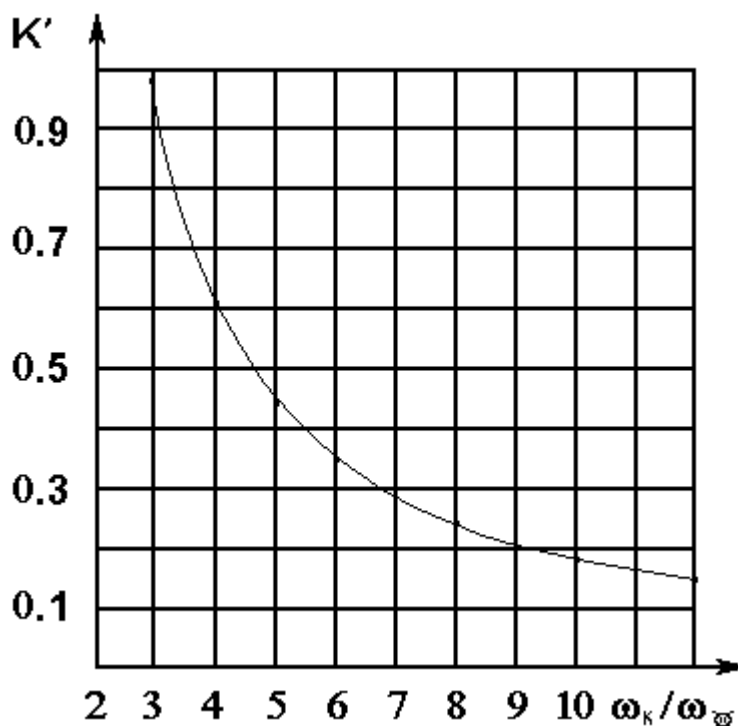


Рис.6

Таким образом, при плавании судна мелководным каналом скоростное проседание будет определяться, как

$$\Delta d_v = \Delta d_k + \Delta d'_k \quad (9)$$

Все вышеприведенные формулы предназначены для расчета проседания мало- и среднетоннажных судов ($\Delta < 30\,000$ т).

1.1.4. Графический метод NPL

Как уже говорилось, крупнотоннажные суда, имеющие полнообводные формы корпуса ($C_b \geq 0.8$), при движении на мелководье проседают больше носом, чем кормой. Для определения скоростного проседания таких судов можно воспользоваться номограммой NPL (National Physical Laboratory), приведенной на рис.7.

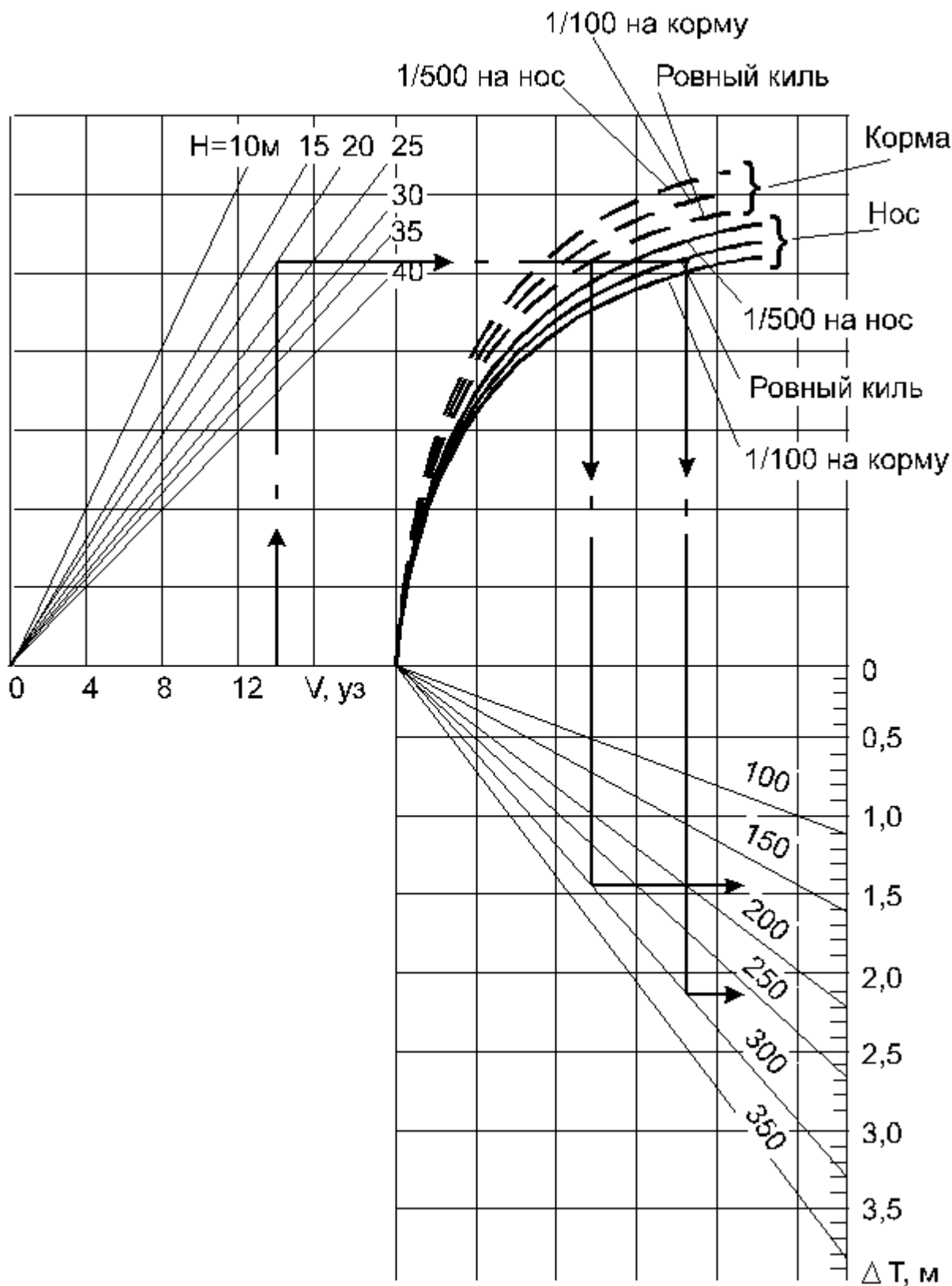


Рис.7

1.1.5. Универсальный метод Ремиша

В [6] приводится метод Ремиша, который позволяет определять скоростное проседание при плавании на мелководье и в канале. Этот метод учитывает основные параметры судна и может быть применен для судов с различными размерами и полнотой обводов.

Увеличение осадки на мелководье (в метрах) отдельно для носа и кормы рассчитывается по формуле

$$\Delta d = 0.55 * C_v * C_{\delta} * (H_{zл} - d)(H_{zл} / d - 0.4)^{-2}, \quad (10)$$

где d - осадка носом или кормой соответственно, м;

C_{δ} - коэффициент, зависящий от формы корпуса;

C_v - коэффициент, зависящий от скорости хода, рассчитываемый по формуле:

$$C_v = 8 * (V/V'_{кр})^2 * [(V/V'_{кр} - 0.5)^4 + 0.0625], \quad (11)$$

где V - скорость судна, м/с;

$V'_{кр}$ - критическая скорость для мелководья, м/с, определяемая из выражения:

$$V'_{кр} = 1.28 H_{zл}^{0.625} \left(\frac{L}{d * B} \right)^{0.125} \quad (12)$$

Коэффициент C_{δ} отдельно для носа и кормы определяется из следующих выражений:

$$\left. \begin{aligned} C_{\delta к} &= 1 \\ C_{\delta н} &= \frac{90 * C_{\sigma}^2 * B^2}{L^2} \end{aligned} \right\} \quad (13)$$

где C_{σ} - коэффициент общей полноты судна.

При анализе (13) и (10) видно, что при $C_{\delta н} > 1$ проседание носа больше, чем кормой, а при $C_{\delta н} < 1$ - больше проседание кормы, чем носа.

Для расчета проседания судна в канале величину критической скорости $V'_{кр}$, входящую в (11), следует рассчитывать по формуле:

$$V'_{кр} = k * \sqrt{g * H_{zл}}, \quad (14)$$

в которой

$$k = 0.266 \sqrt{n - 1}, \quad (15)$$

где n - отношение площади поперечного сечения канала Ω_k к площади погруженной части мидель-шпангоута Ω_{\otimes} :

$$(16)$$

$$n = \omega_k / \omega_\infty$$

1.2. Влияние мелководья на скорость движения судна.

Критическая скорость.

Сопротивление воды движению судна условно делят на вязкостное и волновое. Влияние мелководья на скорость движения судна заключается в изменении как вязкостного, так и волнового сопротивлений.

Увеличение вязкостного сопротивления на мелководье связано с изменением поля вызванных скоростей. В разделе 1.1 были вкратце описаны причины увеличения скорости потока воды, обтекающей корпус судна при движении на мелководье и в канале. А рост скоростного потока, естественно, приводит к росту вязкостного сопротивления.

Рост вязкостного сопротивления сильно зависит от соотношения глубины и осадки судна, что наглядно отражено на графике (рис.8), полученном на основании материалов испытаний модели судна [2].

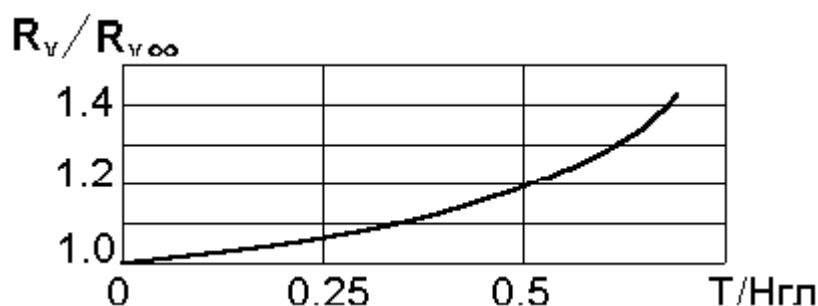


Рис.8

Здесь величина $R_v / R_{v\infty}$ - есть отношение вязкостных сопротивлений на мелководье и на глубокой воде соответственно.

Еще большее изменение при ограничении глубины претерпевает волновое сопротивление. Как уже упоминалось выше, движущееся судно создает вокруг себя систему поперечных волн и систему расходящихся волн в виде сектора. Из теории волн относительно малой амплитуды известно, что при равных скоростях распространения прогрессивных волн их длина λ на мелкой воде больше, чем на глубокой.

Зависимость между длиной волны от ее скоростью определяется следующим выражением:

$$\lambda = 2 \pi * V_e^2 / g \quad (17)$$

Предельной скоростью распространения волн данного типа в условиях мелководья является критическая скорость $V_{кр}$, соответствующая числу Фруда по глубине $Fr_H \approx 1$, м/с:

$$V_{кр} = \sqrt{g * H_{гл}} \quad (18)$$

Из этого следует, что предельная длина волн данного типа на мелководье зависит от глубины:

$$\lambda_{кр} = 2 \pi * H_{гл} \quad (19)$$

Однако, скорость волн, создаваемых движущимся судном, зависит от скорости судна. И поскольку существует зависимость между длиной волны и ее скоростью, то задавая скорость расходящимся волнам судно тем самым задает им и длину.

Исходя из выражения (19) получается, что если глубина моря ограничивает предельную длину волн, то этим она задает предельно возможную скорость распространения волн.

По мере приближения скорости судна V_c к критическому значению $V_{кр}$ (либо увеличение скорости судна, либо уменьшение глубины моря) длины расходящихся волн увеличиваются, что приводит к расширению волнового сектора (см. рис. 3, а). Расширяющийся сектор взволнованной поверхности требует все больших энергетических затрат на свое поддержание. И наконец, при $V_c \approx V_{кр}$, когда угол фронта расходящихся волн носовой и кормовой групп с диаметральной плоскостью судна близок к 90° , происходит сложение поперечных и расходящихся систем волн, образуются две мощные поперечные волны, которые как бы запирают судно.

Поскольку волны достигли предельной длины (и соответственно, предельной скорости) и двигаться быстрее уже не могут, то дальнейшее увеличение мощности, передаваемой на винт, приводит лишь к увеличению амплитуды этих волн, но не дает увеличения скорости судна. Для преодоления этого барьера двигатель должен развить такую мощность, которая бы на глубокой воде соответствовала скорости судна на 5-6 узлов больше, чем эта $V_{кр}$.

Потерю скорости на мелководье (в %) при плавании в зоне докритических скоростей можно приближенно рассчитать по эмпирической формуле Демина [6]:

$$\Delta V = 4.4 \frac{H_{зл}}{d} - 34 \frac{V_c}{g * H_{зл}} \quad (20)$$

Значение должно получаться со знаком “минус”, если же получается положительное значение, то потерю скорости считают равной нулю.

После преодоления судном критической скорости поперечные волны им больше не создаются, и остаются лишь расходящиеся волны, что приводит к существенному уменьшению волнового сопротивления.

Мощная поперечная волна, образующаяся при достижении судном скорости, близкой к критической, не подчиняется теории волн относительно малой амплитуды, и скорость ее дальнейшего движения уже не зависит от скорости судна. Эта волна (“спутная волна”) может самостоятельно перемещаться на очень большие расстояния со скоростью, при которой она образовалась. Так академик А.Н.Крылов в книге “Мои воспоминания” описывает случай, когда спутной волной, образовавшейся в 6 милях от берега при прохождении над банкой миноносца “Новик” в 1912 году, был смыт с пристани 6-летний мальчик.

1.3. Управляемость и инерционные характеристики судна на мелководье и в узкости

Влияние мелководья на управляемость судна проявляется в снижении эффективности пера руля. Происходит это по следующим причинам. Как уже говорилось, движущееся судно имеет перепад давлений вдоль корпуса. В результате этого уровень воды в средней части пониженный, а в районе форштевня и ахтерштевня - повышенный. Перепад уровней воды в кормовой оконечности приводит к тому, что вода, перетекая от повышенного уровня к пониженному, образует попутный поток, скорость которого зависит от величины перепада уровней воды. При движении судна на мелководье перепад давлений (и как следствие - уровней воды) увеличивается по мере приближения скорости судна к ее критическому значению $V_{кр}$.

Вращающий момент, создаваемый пером руля, при всех прочих равных условиях зависит от скорости набегающего потока. Увеличение скорости попутного потока при выходе судна на мелководье снижает скорость набегающего на перо руля потока и, как следствие, снижает эффективность рулевого устройства.

Другим фактором, влияющим на управляемость, является то, что при выходе судна на мелководье для сохранения прежней скорости требуются большие энергетические затраты, чем на глубокой воде. Эта дополнительная энергия расходуется на то, что в процесс волнообразования вовлекаются дополнительные массы воды. Таким образом происходит увеличение кинетической энергии движущейся вместе с судном воды, а следовательно, и кинетической энергии системы “судно плюс присоединенные массы воды”.

Увеличение инерционности судна при падении эффективности пера руля приводит к ухудшению маневренных и тормозных характеристик судна.

Увеличение радиуса установившейся циркуляции на мелководье можно приблизительно определить из выражения [9] :

$$R_m = \frac{R_{\infty}}{1 + 0.1 \frac{d}{H_{zn}} - 0.71 \left(\frac{d}{H_{zn}} \right)^2} \quad (21)$$

где R_{∞} - радиус установившейся циркуляции на глубокой воде.

Конечно, выражение (21) имеет больше информативное значение, чем практическое, т.к. обычно требуется информация об эволюционном периоде циркуляции. Однако, оценив величину изменения радиуса установившейся циркуляции, можно приближенно оценить и степень изменения эволюционного участка циркуляции.

При движении судна в узкости наблюдаются те же явления в поведении судна, что и на мелководье с неограниченной акваторией, только проявляется все это в более резкой форме.

1.4. Влияние рельефа канала на поведение судна.

Расхождение судов в канале.

При движении судна по оси канала влияние обеих стенок симметрично. Смещение судна с оси к одной из стенок приводит к тому, что поле давлений со стороны ближайшего берега имеет более значительные перепады. Более высокое давление в районе форштевня с одной стороны образует более высокую волну и стремится оттолкнуть нос судна в сторону оси фарватера (рис.9,а). То же самое явление происходит, если глубины с правого и левого борта по ходу судна различны. Со стороны более мелководного участка образуется более резкий перепад давлений, и нос судна стремится уклониться в сторону более глубокой воды (рис.9,б).

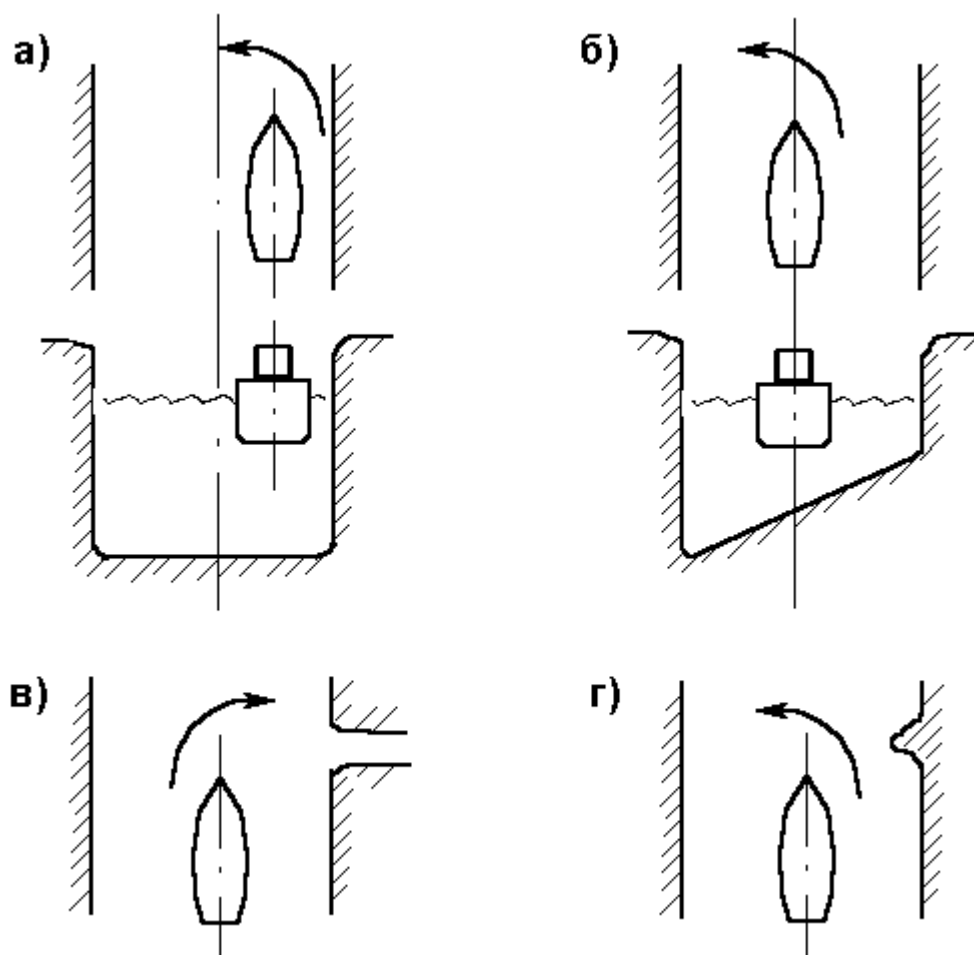


Рис.9

Готовясь к прохождению канала следует проанализировать возможное воздействие рельефа дна и береговой линии на поведение судна. Нужно иметь в виду, что попадающиеся на пути ниши в береговой линии будут притягивать нос судна, а выступы - отталкивать (рис.9, в, г).

Особое внимание следует обратить на возможность встречи в узкости с другим судном. Судоводителю, ведущему судно по каналу, необходимо знать, как ведут себя суда при расхождении.

Особенности поведения судов при расхождении на близком расстоянии связаны со взаимодействием полей давления, формируемыми этими судами. Взаимодействие гидродинамических полей и их влияние на поведение судов при расхождении на встречных курсах последовательно показано на рис.10.

Поле пониженного давления имеет значительно большую протяженность относительно длины корпуса судна, чем поля повышенного давления у носовой и кормовой оконечностей (рис.2.). Следовательно, большую часть времени расхождения гидродинамические поля стремятся сблизить суда.

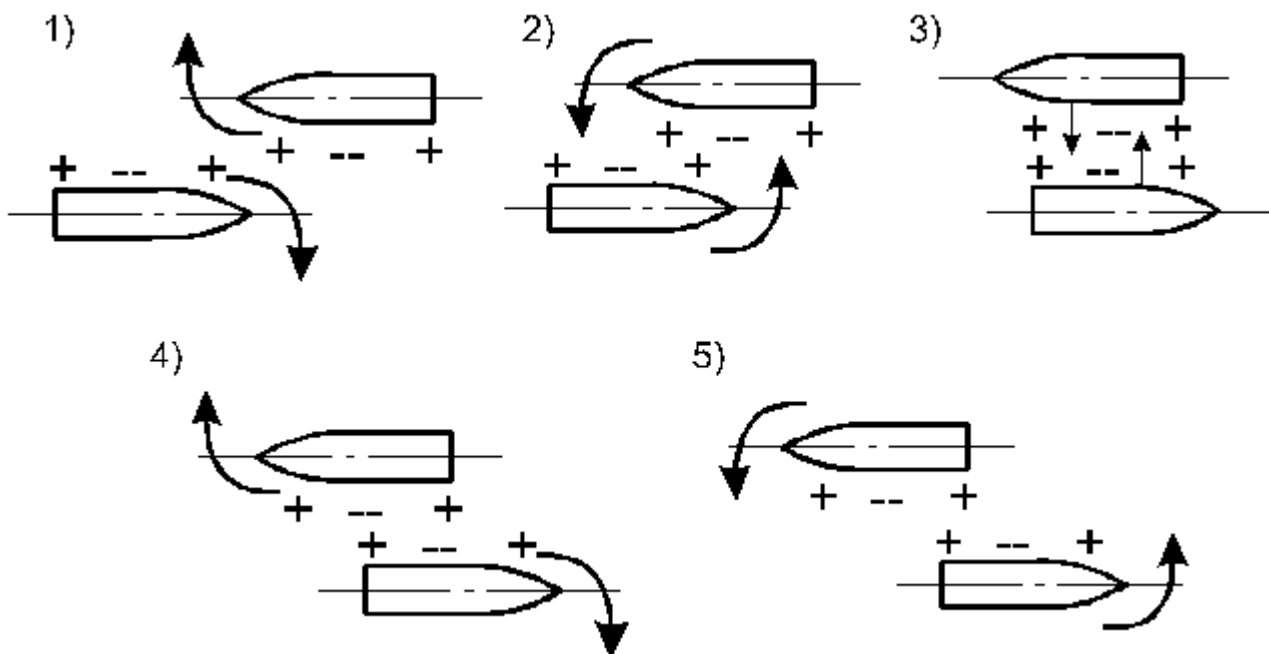


Рис.10

Степень опасности столкновения судов зависит от многих факторов. Факторы, влияющие на формирование поля давления вокруг судна были рассмотрены выше, а сила взаимодействия полей расходящихся судов зависит от расстояния, на котором они расходятся. Кроме того, очень важную роль играет время расхождения. Именно поэтому вероятность столкновения выше при обгоне, чем при расхождении на встречных курсах.

2. РАСЧЕТ БЕЗОПАСНЫХ ПАРАМЕТРОВ ДВИЖЕНИЯ СУДНА ПРИ ПРОХОЖДЕНИИ МЕЛКОВОДЬЯ

При прохождении мелководного участка могут ставиться следующие задачи:

- Определить допустимую осадку судна при заданной скорости движения (прохождение каналов, в которых установлена определенная скорость движения).
- Определить предельно допустимую скорость при данном состоянии судна и окружающей обстановки.
- Определить ограничивающие изобаты при данном состоянии судна и заданной скорости.

Кроме того, любая из задач часто сопровождается условием недопущения возникновения спутной волны.

2.1. Расчет проходной осадки судна

В общем случае при заданной скорости движения допустимую осадку судна $d_{\text{доп}}$ можно определить выражением:

$$d_{\text{доп}} = H_{\text{гд}} - (\Delta d_v + \Delta d_{\text{н.з.}} + \Delta d_e + \Delta d_{\text{кр}} + \Delta d_{\text{пл}}) \quad (22)$$

где $H_{\text{гд}}$ - глубина, м;

Δd_v - скоростное проседание, м;

$\Delta d_{н.з.}$ - навигационный запас, м;

Δd_{θ} - волновой запас, м;

$\Delta d_{кр}$ - увеличение осадки от крена, м;

$\Delta d_{пл}$ - изменение осадки при изменении плотности воды, м.

Скоростное проседание было подробно рассмотрено в разделе 1.1. Для нахождения величины Δd_v используется заданное значение осадки судна d , что практически, не влияет на результат.

2.1.1. Навигационный запас

Навигационным запасом называется такая минимальная глубина под килем судна, которая обеспечивает безопасное плавание на мелководье по тихой воде самой малой скоростью.

В нормативных документах различных государств величина навигационного запаса определяется по-разному. Так, Национальной комиссией США навигационный запас определен в 2 фута (0.6 м).

В отечественных нормах, регламентирующих проектирование портовых акваторий, навигационный запас определен в 0.04 - 0.07 осадки судна в зависимости от типа грунта.

В Наставлениях по организации штурманской службы (НШС-82 и НШСР-86) навигационный запас рекомендуется принимать не менее 0.3 – 0.4 м (в зависимости от плотности грунта).

2.1.2. Волновой запас.

Находясь на взволнованной поверхности воды судно совершает колебания и в вертикальном направлении (рис. 11). Для учета проседания судна на волнении относительно положения на тихой воде вводится понятие волнового запаса.

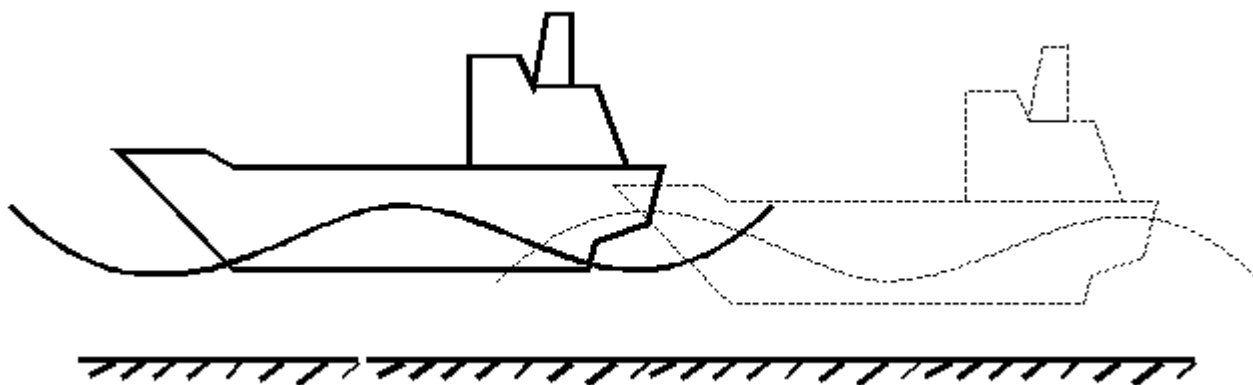


Рис.11

В зарубежной практике в качестве волнового запаса принимается полная амплитуда качки судна. При этом амплитуда килевой качки условно считается равной половине высоты волны, а амплитуда

бортовой качки определяется в зависимости от угла крена, который в расчетах принимается равным 5° .

Исследования, проведенные кафедрой теории корабля ОИИМФа, показали, что амплитуда качки судна зависит не только от высоты волны, но и от соотношения ее длины и длины судна. На основе выполненных исследований были разработаны таблицы волнового запаса в зависимости от длины судна и высоты волны 3%-й обеспеченности. В этих таблицах предусматривалось, что если волна подходит к судну под углом около 35° , табличные значения следовало умножить на коэффициент 1.4, а при угле 90° - на коэффициент 1.7.

В НШС-82 (и НШСР-86) приводится таблица учета волнового запаса, которая была составлена на основании данных таблицы, разработанной в ОИИМФе, данные которой для упрощения расчетов были сразу умножены на коэффициент 1.4. Таким образом, табличные данные по волновому запасу в НШС-82 (и НШСР-86) несколько завышены для курсовых углов волн до 30° и несколько занижены для курсовых углов свыше 40° (табл.6).

Учитывая то, что на практике высота волн определяется на глаз с погрешностью $\pm (20 - 25) \%$, в интересах безопасности табличные данные при курсовых углах волн свыше 40° следует умножить на коэффициент 1.4.

Таблица 6

Длина судна, м	Высота волн, м			
	1	2	3	4
75	0.2	0.7	1.2	2.0
100	0.2	0.6	1.1	1.7
150	0.1	0.4	0.8	1.3
200	0.1	0.3	0.7	1.1
250	-	0.3	0.6	1.0
300	-	0.2	0.5	0.8

2.1.3. Увеличение осадки от крена

Наличие крена у судна увеличивает его осадку (рис.12)

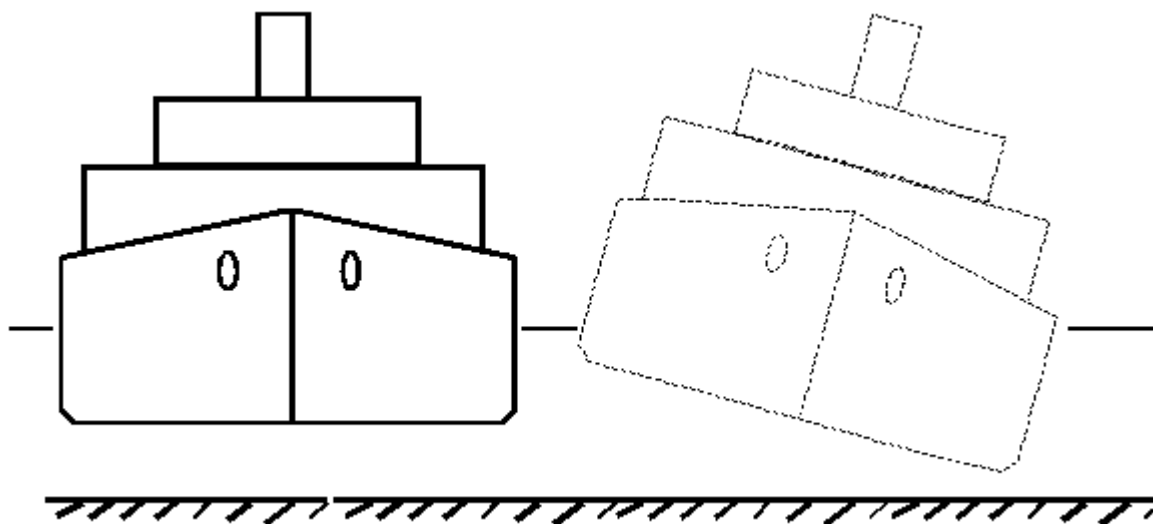


Рис.12.

Величина крена зависит как от ширины судна, так и от угла крена. Поскольку подводная часть корпуса судна имеет сложную конфигурацию, и любое накренение нарушает симметрию погруженной части относительно диаметральной плоскости, то использование простых формул для расчета дополнительного проседания возможно лишь на небольших углах крена, когда эта несимметричность не приводит к существенным погрешностям.

В Наставлениях НШС-82 (НШСР-86) увеличение осадки судна при углах крена $\theta < 10^\circ$ рекомендуется определять (в метрах) из выражения:

$$\Delta d_{кр} \approx 0.008 B * \theta \quad (23)$$

Следует помнить, что отсутствие статического крена не дает основания пренебрегать этой величиной, т.к. у судна может в любой момент появиться динамический крен в результате воздействия ветра или волн.

Кроме того, динамический крен будет иметь место при маневрировании судна, что следует учитывать при движении по криволинейному фарватеру. В этом случае приближенный расчет дополнительного проседания от динамического крена можно произвести на основании того, что на установившейся циркуляции наступает равенство моментов кренящего $M_{кр}$ и восстанавливающего M_B [4]:

$$\left. \begin{aligned} M_{кр} &= 0.233 \frac{\Delta * V_u^2}{g * R_u} \left(Z_g - \frac{d}{2} \right) \\ M_B &= \Delta * h_o * \sin \theta \end{aligned} \right\}, \quad (24)$$

где Δ - водоизмещение судна, кг;

V_u - скорость судна на циркуляции, м/с;

g - ускорение свободного падения, 9.81 м/с²;

R_u - радиус циркуляции, м;

$Z_g = (Z_m - h_o)$ - возвышение центра тяжести над основной плоскостью, м;

Z_m - возвышение метацентра над основной плоскостью, м;

h_o - начальная метацентрическая высота, м.

Выразив угол θ из (24) и подставив его в (23) можно получить формулу для приближенного вычисления ожидаемого приращения осадки от динамического крена, если известны: начальная метацентрическая высота, радиус кривизны фарватера и предстоящая скорость движения:

(25)

$$\Delta d_{кр} \approx 0.008 B * \arcsin \left(\frac{0.233 V_{\psi}^2 (2Z_m - 2h_o - d)}{2h_o * g * R_{\psi}} \right)$$

2.1.4. Изменение осадки при изменении плотности воды

При переходе судна в воду с другой плотностью (заход с моря в реку или наоборот) его осадка изменяется. Величина изменения осадки зависит как от соотношения плотностей воды, так и от конструктивных особенностей судна. В общем случае изменение осадки (в м) можно определить из выражения:

$$\Delta d_{пл} = \frac{\Delta}{q} \left(\frac{\gamma_1}{\gamma_2} - 1 \right) * 10^{-2} \quad (26)$$

где Δ - водоизмещение судна, т;

q - характеристика судна, определяющая "число тонн на 1 см осадки" при данном водоизмещении, т/см, выбирается из судовой документации;

γ_1 - плотность воды, из которой выходит судно, кг/м³;

γ_2 - плотность воды, в которую входит судно, кг/м³.

Плотность пресной воды обычно принимается равной 1000 кг/м³, а средняя плотность океанической воды принимается за 1025 кг/м³. Для конкретных бассейнов она определяется по справочникам и атласам.

2.2. Расчет безопасной скорости

Расчет безопасной (предельно допустимой) скорости ведется на основе формулы (22), только в этом случае ищется предельно допустимое значение скоростного проседания:

$$\Delta d_{в без.} = H_{зл} - (d_{наиб.} + \Delta d_{н.з.} + \Delta d_{г} + \Delta d_{кр} + \Delta d_{пл}) \quad (27)$$

Найдя предельно допустимое значение скоростного проседания можно найти скорость, которой эта величина проседания будет соответствовать.

Решить эту задачу можно с использованием любого из выше рассмотренных методов (разумеется, с соответствующим преобразованием исходных формул), а ниже рассматривается решение на основе преобразованных формул А.П.Ковалева, уз:

$$V_{без.} = \sqrt{\frac{\Delta d_{в без.} * 10^2}{K}} \quad \text{при} \quad \frac{H_{зл}}{d} \leq 1.4 \quad (28)$$

или

$$V_{без.} = \sqrt{\frac{\Delta d_{v без.} * 10^2}{K}} \sqrt{\frac{H_{зл}}{d}} \quad \text{при} \quad 1.5 \leq \frac{H_{зл}}{d} \leq 4 \quad (29)$$

где коэффициент K выбирается из таблицы 4.

При определении безопасной скорости в канале следует учитывать дополнительное проседание. Раскрыв (9) с учетом (7) и (8) получим, что суммарное скоростное проседание судна в канале (в см) определяется выражением:

$$\left. \begin{aligned} \Delta d_v &= V_c^2 (K + K') & \text{при} & \quad \frac{H_{зл}}{d} \leq 1.4 \\ \Delta d_v &= V_c^2 \left(K \sqrt{\frac{H_{зл}}{d}} + K' \right) & \text{при} & \quad 1.5 \leq \frac{H_{зл}}{d} \leq 1.4 \end{aligned} \right\} \quad (30)$$

Выразим отсюда допустимую скорость (уз), задавшись максимально допустимым проседанием:

$$\left. \begin{aligned} V_{без.} &= \sqrt{\frac{\Delta d_{v без.} * 10^2}{K + K'}} & \text{при} & \quad \frac{H_{зл}}{d} \leq 1.4 \\ V_{без.} &= \sqrt{\frac{\Delta d_{v без.} * 10^2}{K \sqrt{\frac{H_{зл}}{d}} + K'}} & \text{при} & \quad 1.5 \leq \frac{H_{зл}}{d} \leq 4 \end{aligned} \right\} \quad (31)$$

где K' выбирается из таблицы 5.

2.3. Возникновение спутной волны

Спутная волна, имеющая большую амплитуду, представляет серьезную опасность для сооружений, находящихся на низменном берегу. Поэтому задача судоводителя заключается в том, чтобы не допустить образования спутной волны. Академик А.Н.Крылов считал, что опасность появления спутной волны возникает при движении судна со скоростью $0.75 - 1.25 V_{кр}$.

При движении судна в канале сопротивление воды существенно отличается от сопротивления на мелководье с неограниченной акваторией и зависит от соотношения площадей ω_k / ω_∞ (поперечного сечения канала ω_k и подводной части мидель-шпангоута ω_∞). При этом увеличивается как вязкостное, так и волновое сопротивление. Причиной тому является ограниченность сечения канала, в результате чего скорость потока, обтекающего судно, увеличивается, а это приводит к росту вязкостного сопротивления. Увеличение скорости потока приводит к более резкому перепаду поля давлений вдоль судна, в результате чего образующиеся волны имеют более сильную амплитуду. А это, естественно,

является причиной более высокого волнового сопротивления.

При движении судна в канале достижение критического значения скорости наступает раньше, чем на неограниченной акватории. Область критических скоростей в канале зависит от соотношения ω_k / ω_∞ , и если при плавании на мелководье с неограниченной акваторией судно может следовать, в общем случае, со скоростью до $0.8 \sqrt{g^* H_m}$, то при движении в канале скорость не должна превышать $0.5 \sqrt{g^* H_m}$.

В Наставлениях НШС-82 (НШСР-86) приводится таблица, которая определяет допустимую скорость судна, при которой не образуется спутная волна (для $H_{эл} / d \leq 1.4$; $6 \leq L/B \leq 9$) (табл.8).

Таблица 8

Глубина, м	3	5	7	8	10	12	16	20	30
Скорость судна, уз	4.3	5.6	6.6	7.0	7.8	8.6	9.8	11.0	14.0

Эта таблица соответствует скорости судна $V_c \approx 0.4 \sqrt{g^* H_m}$ и никак не учитывает соотношение ширины судна с шириной канала.

Группа специалистов, занимавшаяся проблемами проводки крупнотоннажных судов Ленморканалом, разработала рекомендации по выдерживанию скорости движения в канале в зависимости от стесненности фарватера (табл.9) [7].

Таблица 9

ω_k / ω_A	2.5	4	5 - 6
Скорость судна, м/с	$(0.20 \div 0.25) \sqrt{g^* H_{эл}}$	$(0.40 \div 0.50) \sqrt{g^* H_{эл}}$	$0.5 \sqrt{g^* H_{эл}}$

2.4. Определение ограничивающих изобат

Расчет минимально допустимой глубины для прохождения судна ведется аналогично расчету проходной осадки (раздел 2.1.). Разница состоит лишь в том, что в первом случае искалась допустимая осадка судна при заданной глубине, а в этом случае ищется глубина при заданной осадке:

$$H_{мин.эл} = d_{наиб.} + (\Delta d_v + \Delta d_{н.з.} + \Delta d_g + \Delta d_{кр} + \Delta d_{пл}) \quad (32)$$

Формулы расчета скоростного проседания Δd_v учитывают соотношение глубины и осадки судна. Однако в данном случае нас интересует скоростное проседание при плавании с предельно малым запасом воды под килем, поэтому не будет существенной ошибки, если это соотношение принять равным единице и рассчитывать скоростное проседание с этим допущением.

Решение уравнения (32) дает значение изобаты, выше которой судно не должно заходить.

Рекомендуемая литература

1. Управление судном и его техническая эксплуатация / Под ред. А.И.Щетининой. 3-е изд., перераб. и доп. М.: Транспорт, 1983. - 656 с.
2. Войткунский Я.И. Сопротивление движению судов. 2-е изд., перераб. и доп. Л.: Судостроение, 1988. - 288 с.
3. Наставление по организации штурманской службы на морских судах флота рыбной промышленности СССР/Гипрорыбфлот. Л.:Транспорт,1987. -135 с.
4. Аксютин Л.Р. Борьба с авариями морских судов от потери остойчивости. Л.: Судостроение, 1986. -160 с.
5. Ковалев А.П. К вопросу о проседании судна на мелководье и в канале // Морской транспорт. Сер. Безопасность мореплавания. 1984. Вып.5 (165). с. 19-22.
6. Справочник капитана дальнего плавания / Под ред. Г.Г.Ермолаева. М.: Транспорт, 1988. - 211 с.
7. Паданев Ф.И., Шувалов В.П. Обеспечение безопасности проводки судов с предельными осадками // Морской транспорт. Сер. Безопасность мореплавания. 1983. Вып.6 (156). с. 11-18.
8. Козырь Л.А. Плавание крупнотоннажных судов Суэцким каналом // ЦБНТИ: Сер. Судовождение и связь. 1977. Вып.6 (101).
9. Антонов В.А. Теоретические вопросы управления судном. Владивосток, 1988. - 112 с.

[НАЗАД В "СОВЕТЫ БЫВАЛЫХ"](#)