

# Управление судном на мелководье и узкостях



# Плавание на мелководье

---

К основным отличительным особенностям поведения судна на мелководье можно отнести:

- ухудшение управляемости,
- увеличение тормозного пути,
- дополнительное проседание с изменением посадки,
- падение скорости при тех же энергетических затратах,
- влияние рельефа дна и берега на поведение судна.

# ВЛИЯНИЕ МЕЛКОВОДЬЯ НА ДВИЖУЩЕЕСЯ СУДНО

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:

$$H_{2л} < 4d + \frac{3V_c^2}{g}$$

где  $H_{2л}$  - глубина, м;

$d$  - средняя осадка судна, м;

$V_c$  - скорость судна, м/с;

$g$  - ускорение свободного падения, 9.81 м/с<sup>2</sup>.

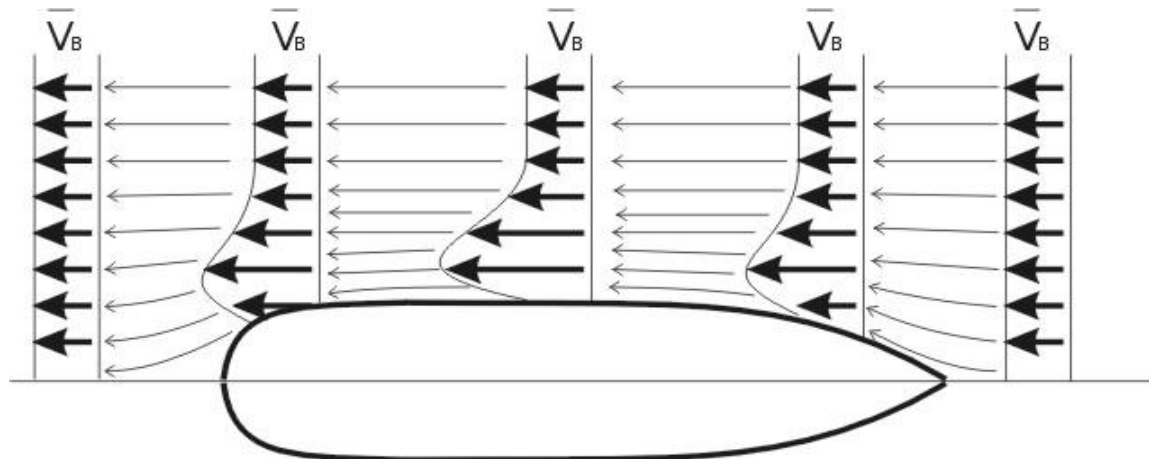
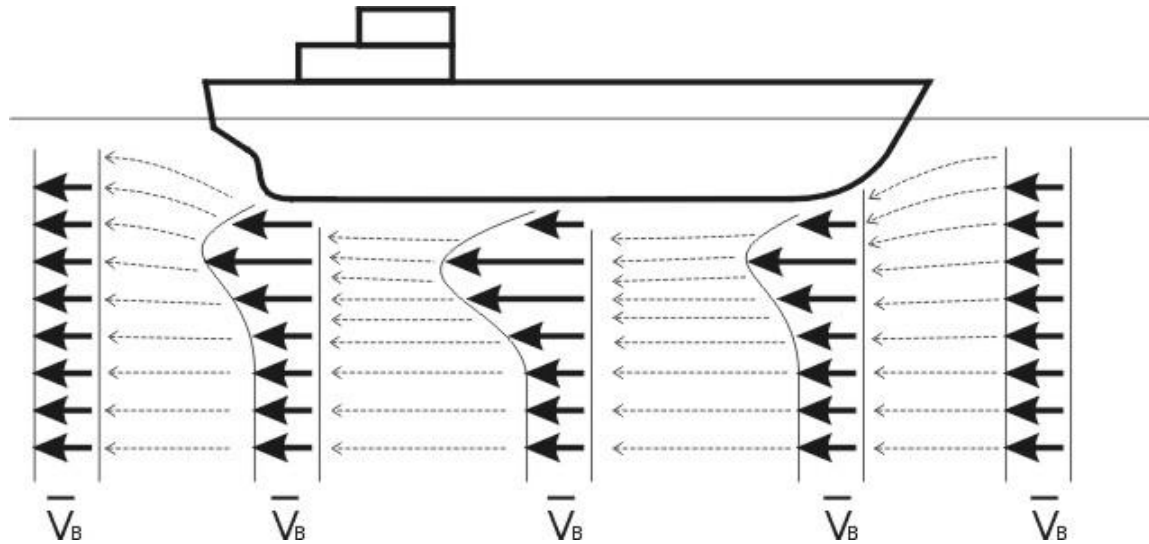
Другим критерием оценки влияния мелководья, связанным с изменением картины волнообразования, является “число Фруда” по глубине:

$$Fr_H = \frac{V_c}{g * H_{2л}}$$

Согласно этому критерию ощутимое влияние мелководья начинает проявляться при  $Fr_H > 0.4 \div 0.5$ .

# Обтекание корпуса

Частицы воды, встречающие на своем пути корпус судна, вынуждены его обгибать вдоль бортов и днища и заполнить пространство, образующееся за кормой.

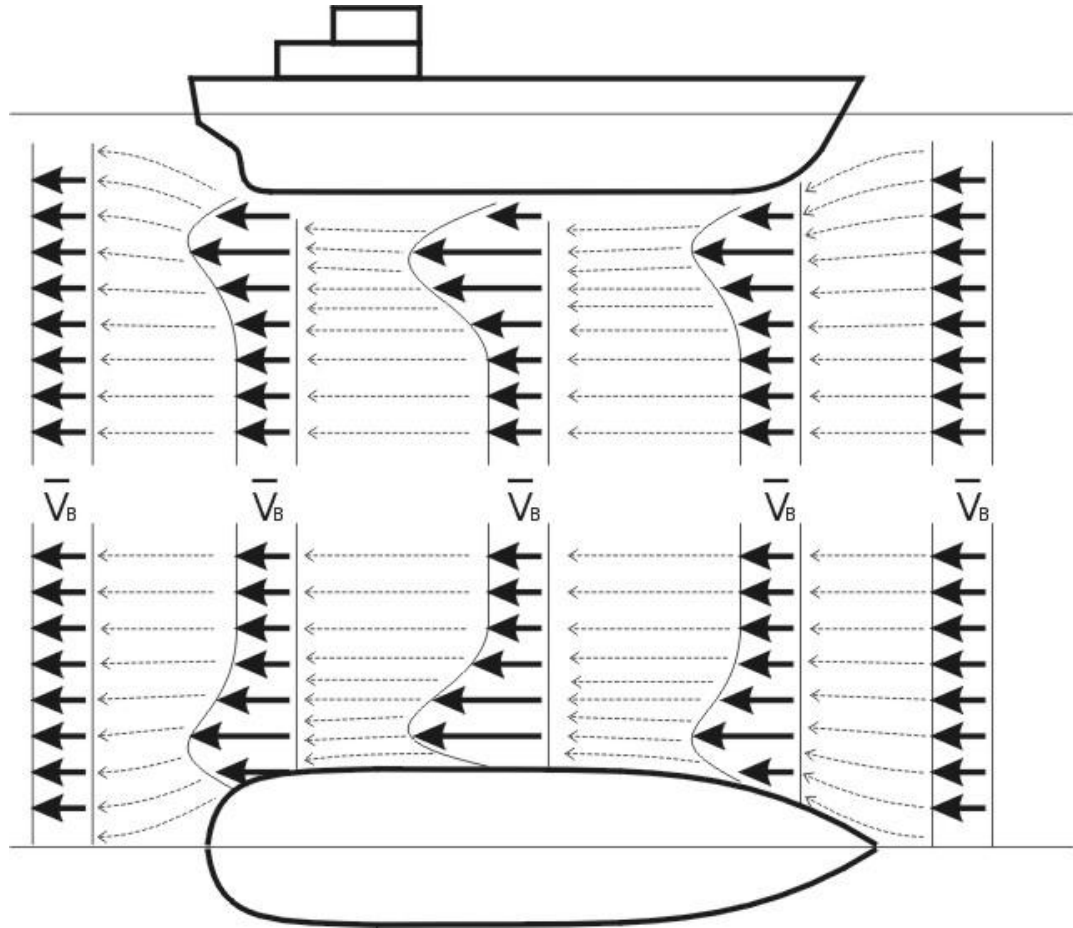


# Поле вызванных скоростей

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

$$\frac{P}{\gamma} + \frac{V_{\epsilon}^2}{2g} = \mathit{const} \quad ,$$

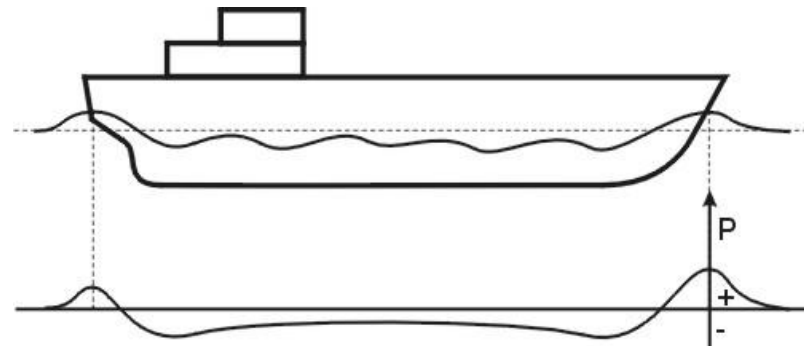
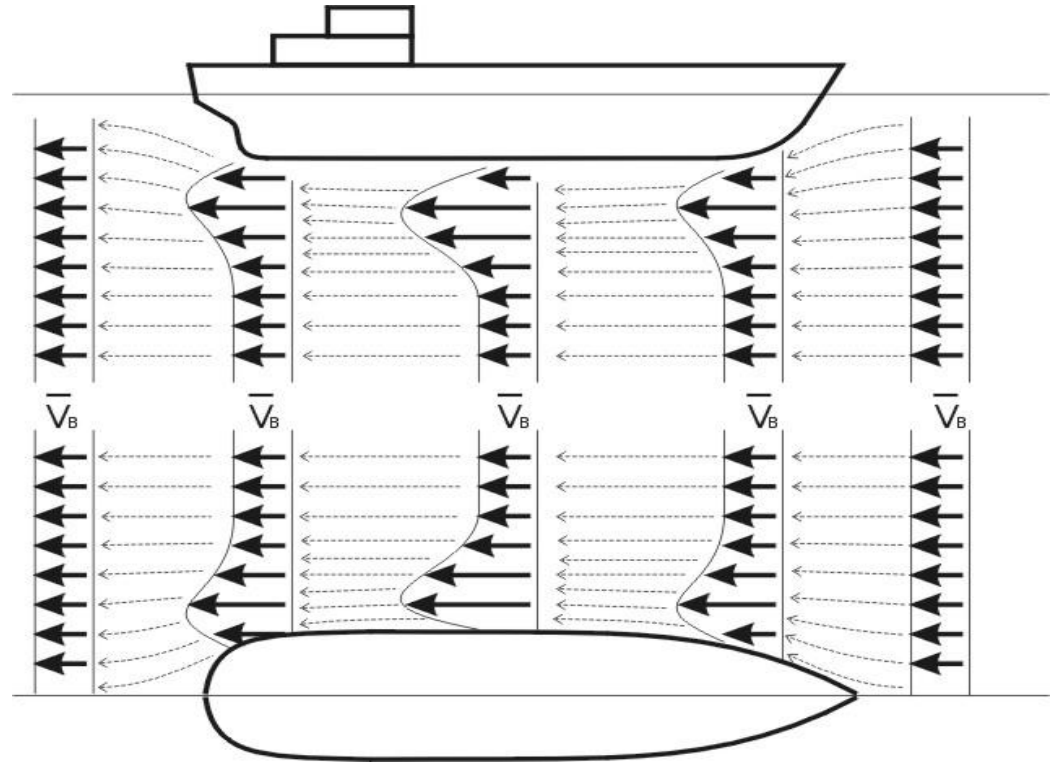
где  $P$  - давление жидкости на данном участке;  
 $\gamma$  - плотность жидкости;  
 $V_{\epsilon}$  - скорость потока.



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

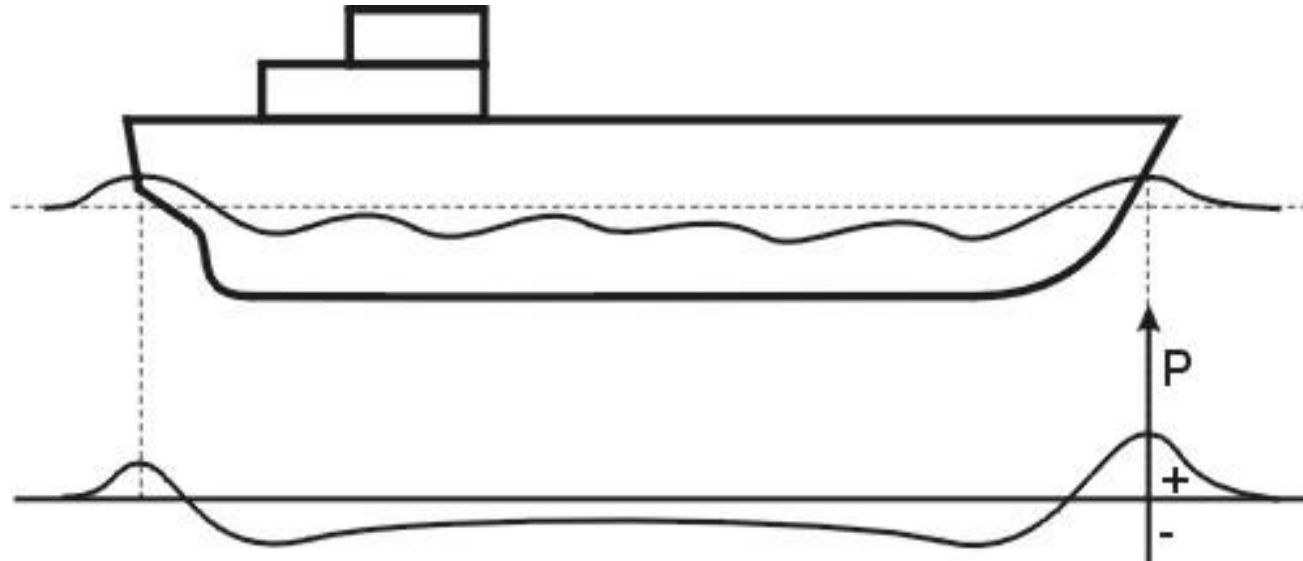
# Поле давления

Поле вызванных скоростей не симметрично относительно миделя, следовательно, не симметрично и поле давления воды вдоль движущегося судна.





# Поле давления



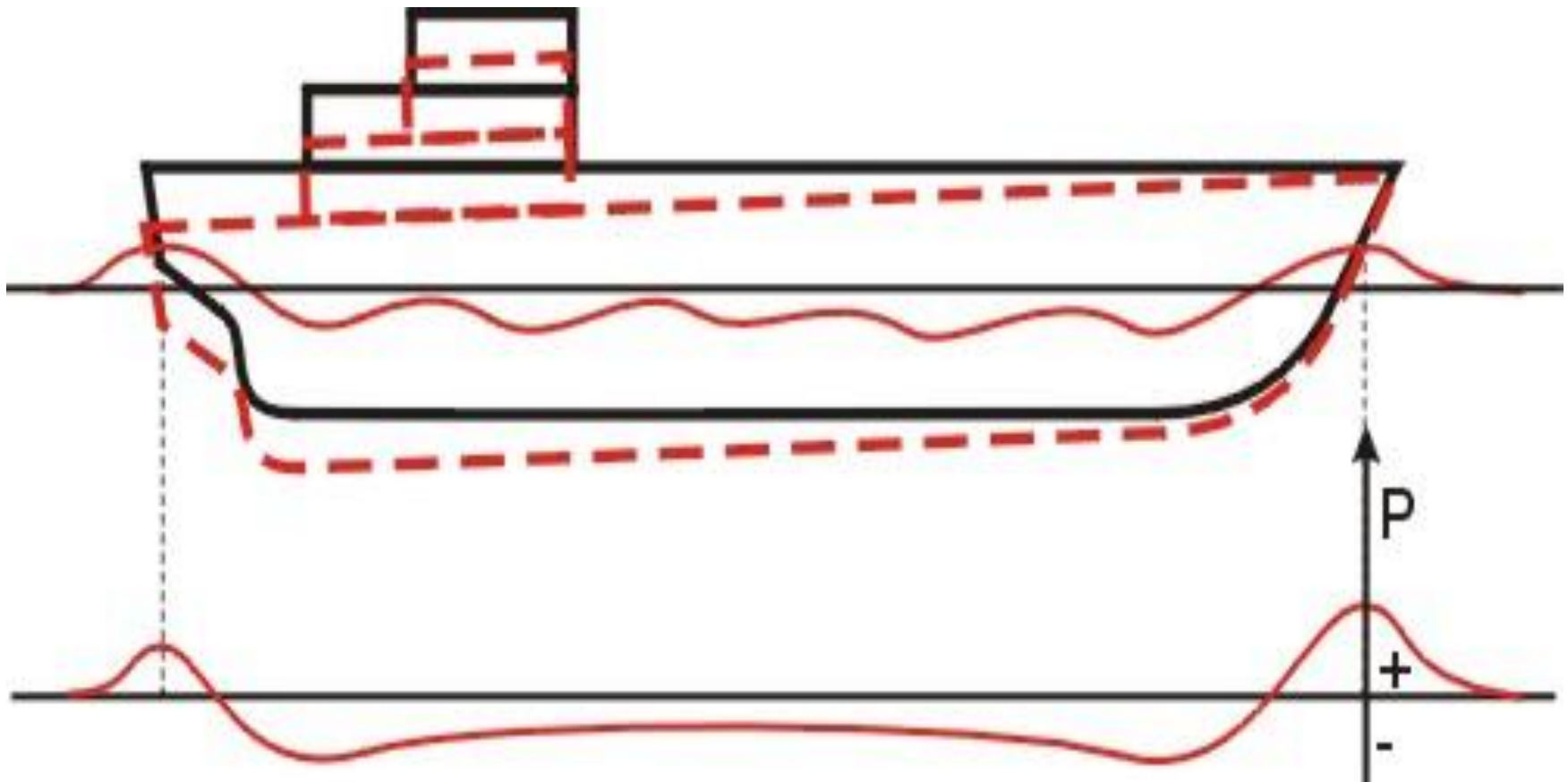
В носовой части формируется поле повышенного давления за счет лобового сопротивления формы корпуса, замедляющего набегающий поток.

В кормовой части происходит замедление потока, огибающего судно, (а следовательно, и повышение давления) за счет влияния “попутного потока”.

Кроме того, работа винта, создающего дополнительное разрежение воды у кормовой оконечности, существенно влияет на результирующую величину поля давлений.

# Скоростное проседание

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





# Скоростное проседание

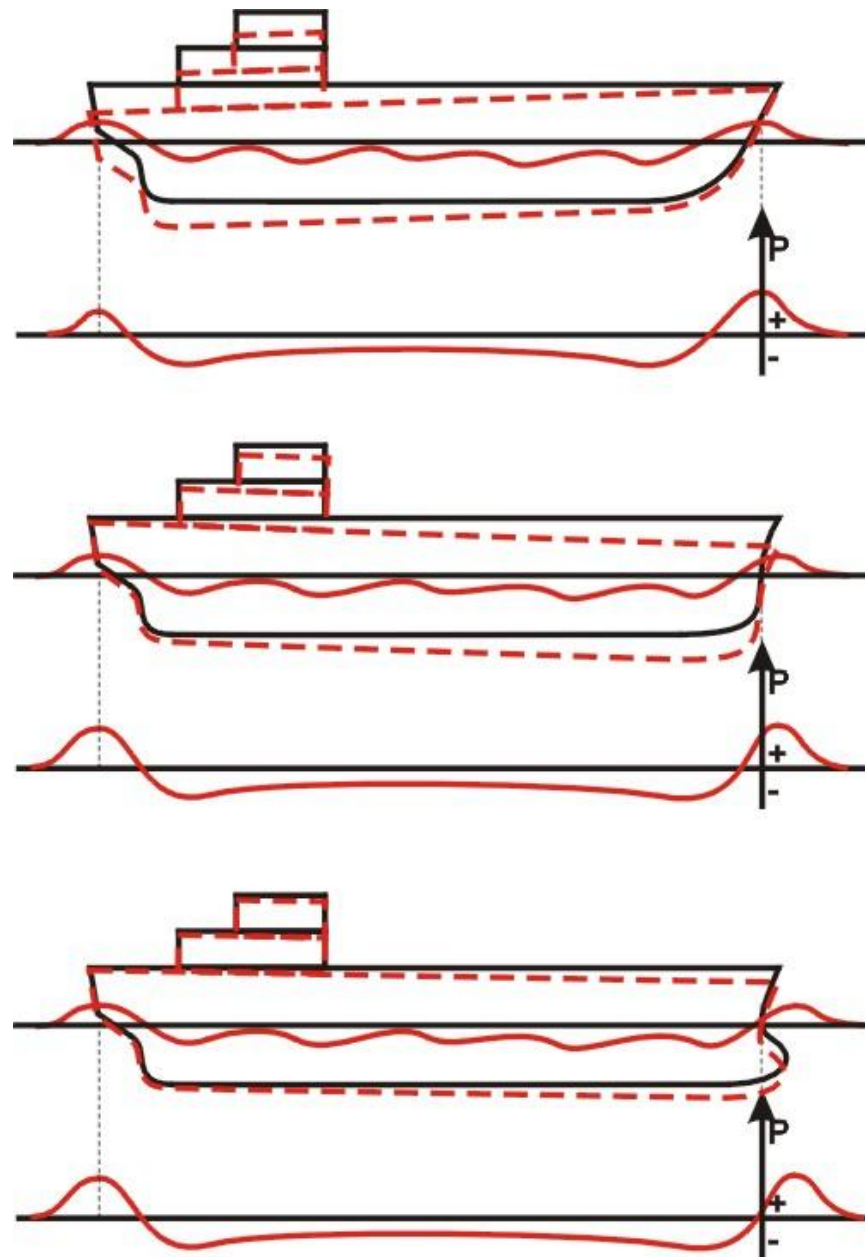
Участки повышенного давления в носовой и кормовой оконечностях имеют разную природу и разные величины.

Несимметричность поля давления вдоль корпуса приводит к тому, что скоростное проседание происходит с изменением дифферента судна.

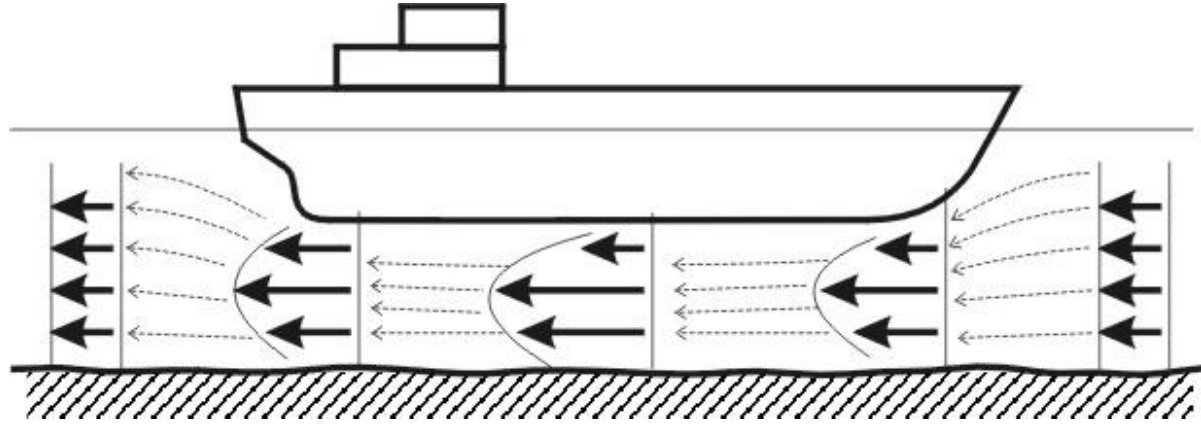
Для большинства судов, имеющих обычную конфигурацию корпуса (без носового бульба), характерно проседание с дифферентом на корму.

Скоростное проседание с дифферентом на нос характерно для судов с носовым бульбом и для крупнотоннажных судов с коэффициентом общей полноты

$$C_e \geq 0.8$$



# Скоростное проседание на мелководье

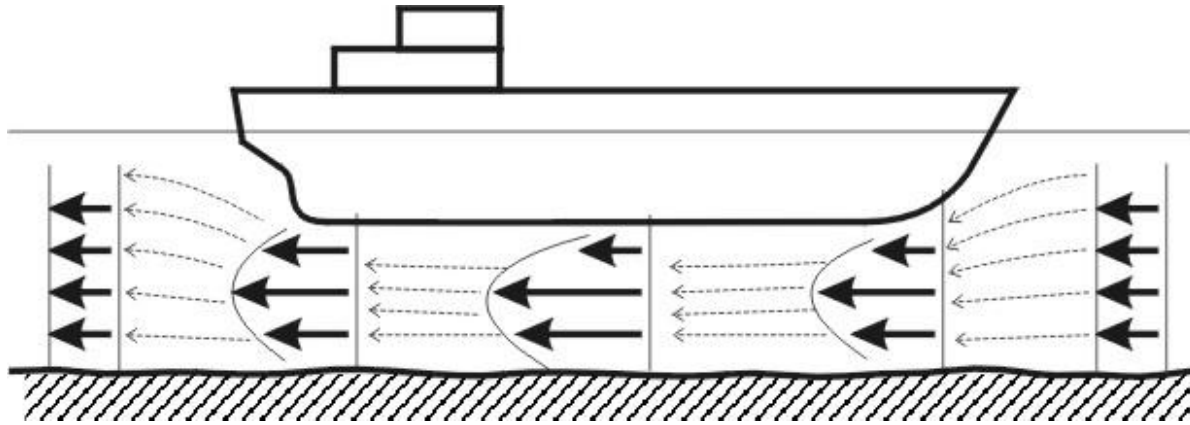


**Скоростное проседание движущегося судна на мелководье увеличивается, чему причиной является малый запас воды под килем.**

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.

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.

# Скоростное проседание на мелководье



Чем меньше пространства под днищем для прохода воды,

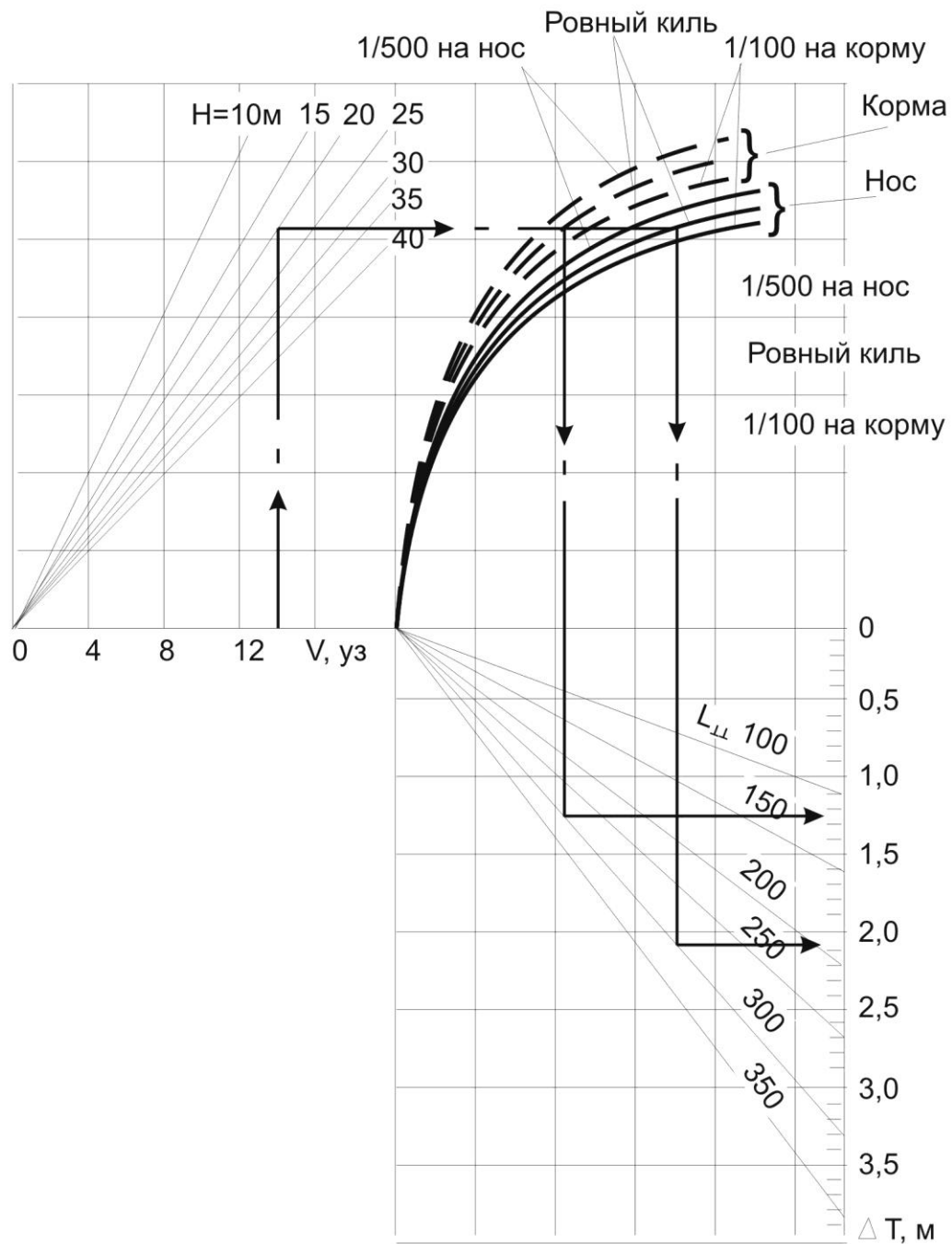
↪ тем быстрее вода вынуждена двигаться,

↪ тем сильнее падает давление под корпусом,

↪ тем сильнее проседание.

# Расчет скоростного проседания

## Графический метод NPL



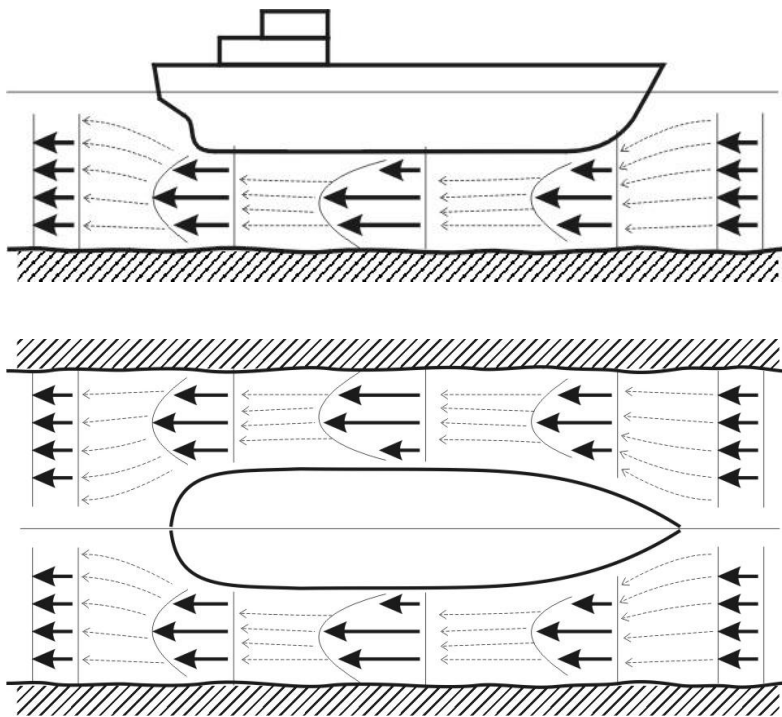
$$\Delta d = K (0.1 * V_c)^2 \quad \text{при} \quad H_{\text{эл}}/d \leq 1.4$$

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

$V_c$  - скорость движения судна, уз

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

# Скоростное проседание в канале



При движении судна на мелководье с ограниченной акваторией (в узкости) на поле вызванных скоростей оказывают влияние не только дно, но и стенки канала.

Скорость потока увеличивается не только под днищем, но и со стороны бортов.

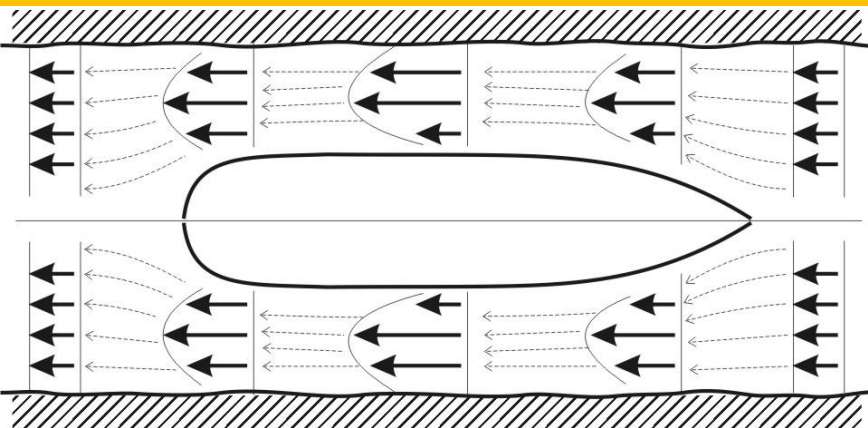
$$\frac{P}{\gamma} + \frac{V^2}{2g} = const$$

В результате этого воздействия перепады поля давлений вокруг судна имеют большую амплитуду, чем в условиях неограниченной акватории.

Дополнительное падение давления приводит к дополнительному проседанию.



# Скоростное проседание в канале



Четкой границы между мелководьем с неограниченной и ограниченной акваторией нет.

Дополнительным параметром при оценке поведения судна в мелководном канале служит отношение  $\omega_K / \omega_{\otimes}$ ,

где  $\omega_K$  - площадь поперечного сечения канала, а

$\omega_{\otimes}$  - площадь поперечного сечения погруженной части мидельшпангоута.

Ощутимое влияние узкости на проседание начинает сказываться при

$$\omega_K / \omega_{\otimes} < 12 .$$

# Скоростное проседание в канале

Из известных в отечественной литературе методов определения скоростного проседания судна в канале:

## 1. Формулы Ковалева:

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.

## 1. Универсальный метод Ремиша:

Справочник капитана дальнего плавания / Под ред. Г.Г.Ермолаева. М.: Транспорт, 1988. - 211 с.

Эти методы позволяют вычислять скоростное проседание носа и кормы отдельно как на мелководье неограниченной акватории, так и в канале.

---

Подробно рассмотрены в эл. пособии «плавание на мелководье и в узкостях»

URL: <http://sv.morfish.ru/wp-content/uploads/gannesen/Melkovod/index.htm>

# 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 **ограничивающие изобаты** при данном состоянии судна и заданной скорости.

Определить предельно **допустимую скорость** при данном состоянии судна и окружающей обстановки.

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

# Расчет проходной осадки судна

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

$$d_{доп.} = H_{гл} - (\Delta d_v + \Delta d_{н.з.} + \Delta d_w + \Delta d_{кр} + \Delta d_{пл})$$

где  $H_{гл}$  - глубина, м;

$\Delta d_v$  - скоростное проседание, м;

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

$\Delta d_w$  - волновой запас, м;

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

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

# Навигационный запас

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

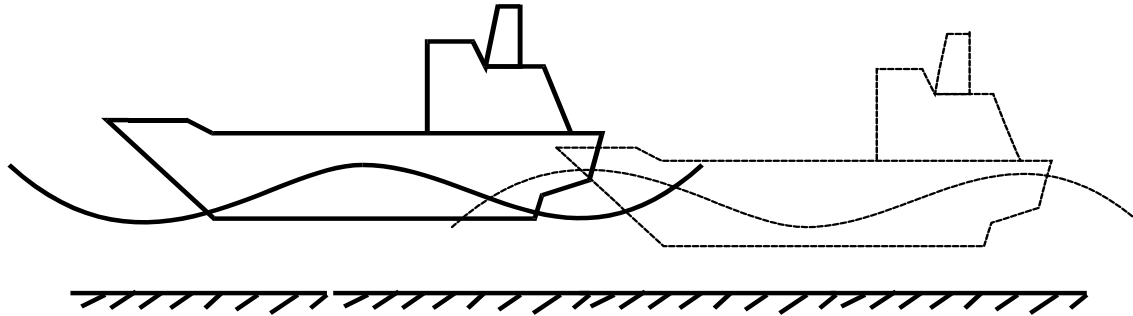
В нормативных документах различных государств величина навигационного запаса определяется по-разному. Так, Национальной комиссией США навигационный запас определен в 2 фута (0.6 м).

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.

# Волновой запас

Находясь на взволнованной поверхности воды судно совершает колебания в вертикальном направлении.



Для учета проседания судна на волнении относительно положения на тихой воде вводится понятие волнового запаса.

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  $5^\circ$ .



# Волновой запас

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.

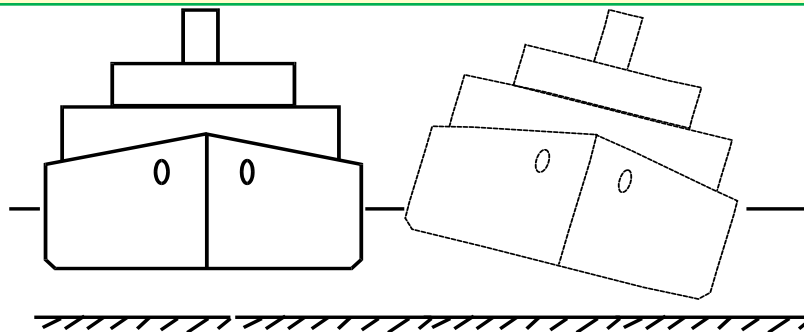
В НШС-82 (и НШСР-86) приводится таблица учета волнового запаса, которые несколько завышены для курсовых углов волн до  $30^\circ$  и несколько занижены для курсовых углов свыше  $40^\circ$ .

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

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

# Увеличение осадки от крена

Наличие крена у судна увеличивает его осадку



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:

$$\Delta d_{кр} \approx 0.008 B * \theta .$$

# Увеличение осадки от крена

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  $M_{в}$ :

$$M_{кр} = 0.233 \frac{\Delta * V_y^2}{g * R_y} \left( Z_g - \frac{d}{2} \right)$$
$$M_{в} = \Delta * h_o * \sin \theta$$

где  $\Delta$  - водоизмещение судна, кг;  
 $V_y$  - скорость судна на циркуляции, м/с;  
 $g$  - ускорение свободного падения, 9.81 м/с<sup>2</sup>;  
 $R_y$  - 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.

# Увеличение осадки от динамического крена при маневрировании

Преобразовав:

$$\left. \begin{aligned} M_{кр} &= 0.233 \frac{\Delta * V_{ц}^2}{g * R_{ц}} \left( Z_g - \frac{d}{2} \right) \\ M_{с} &= \Delta * h_o * \sin \theta \end{aligned} \right\}$$

можно получить формулу для приближенного вычисления ожидаемого приращения осадки от динамического крена:

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

если известны:

- начальная метацентрическая высота,
- радиус кривизны фарватера и
- предстоящая скорость движения

# 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:

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

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

$\gamma_1$  - плотность воды, из которой выходит судно, кг/м<sup>3</sup>;

$\gamma_2$  - плотность воды, в которую входит судно, кг/м<sup>3</sup>.

# Расчет безопасной скорости

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

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

Найдя предельно допустимое значение скоростного проседания  $\Delta d_{v \text{ без.}}$  можно найти скорость, которой эта величина проседания будет соответствовать.



# Расчет безопасной скорости

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:

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

или

$$V_{\text{без.}} = \sqrt{\frac{\Delta d_{\text{в без.}} * 10^2}{K}} \sqrt{\frac{H_{\text{гЛ}}}{d}} \quad \text{при} \quad 1.5 \leq \frac{H_{\text{гЛ}}}{d} \leq 4$$

Где коэффициент ***K*** выбирается из таблицы

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

# Определение ограничивающих изобат

Расчет минимально допустимой глубины для прохождения судна ведется аналогично расчету проходной осадки.

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

$$H_{\text{мин.гл}} = d_{\text{наиб.}} + (\Delta d_v + \Delta d_{\text{н.з.}} + \Delta d_v + \Delta d_{\text{кр}} + \Delta d_{\text{пл}})$$

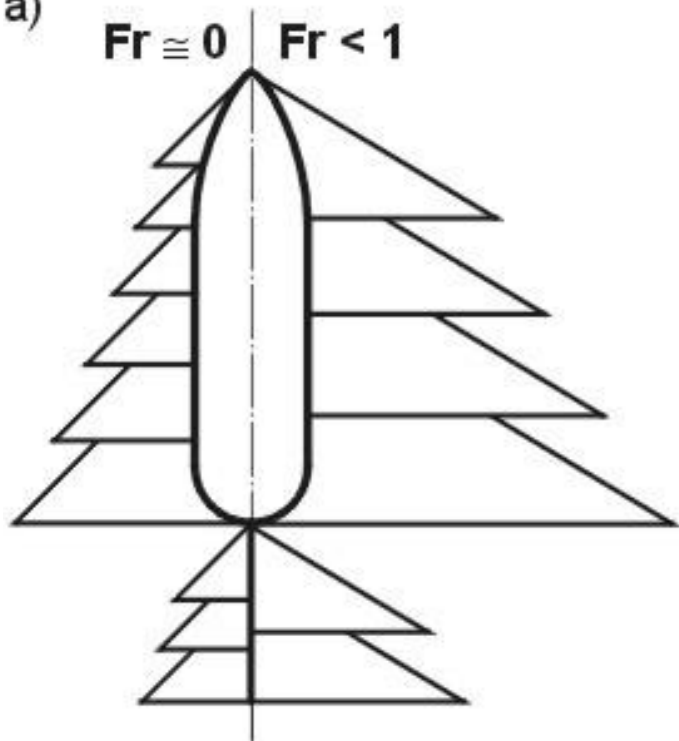
Решение уравнения дает значение изобаты, выше которой судно не должно заходить.

Примечание: Формулы расчета скоростного проседания  $\Delta d_v$  учитывают соотношение глубины  $H_{\text{гл}}$  и осадки судна  $d_{\text{наиб.}}$ .

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  $H_{\text{гл}} / d_{\text{наиб.}} = 1,2$  и рассчитывать скоростное проседание с этим допущением.

# Спутные волны и критическая скорость

a)

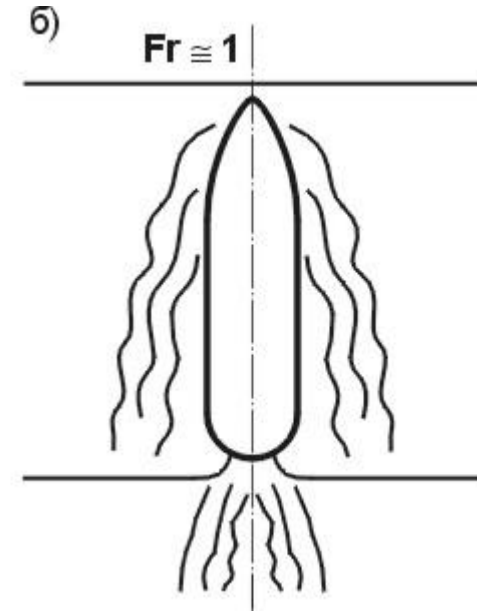
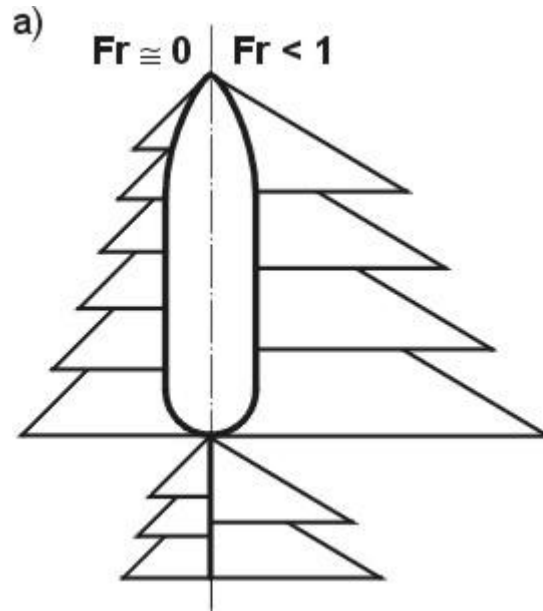


В общем случае движущееся судно образует две системы волн:

1. поперечную, распространяющуюся перпендикулярно диаметральной плоскости судна, и
2. систему волн, образующую сектор.

# Спутные волны и критическая скорость

$$Fr_H = \frac{V_c}{\sqrt{g^* H_{гл}}}$$



По мере роста скорости судна увеличивается длина волны, что приводит к расширению волнового сектора с увеличением угла фронта расходящихся волн к ДП судна.

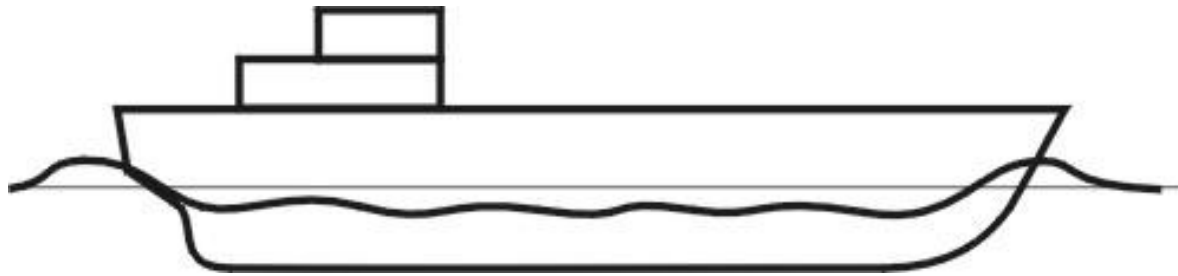
При неизменной скорости, но с уменьшением глубины также происходит увеличение угла фронта расходящихся волн к ДП судна.

При достижении скорости судна значения, близкого к критическому ( $Fr \approx 1$ ), поперечные и расходящиеся волны вырождаются в две поперечные волны - носовую и кормовую (рис. б).

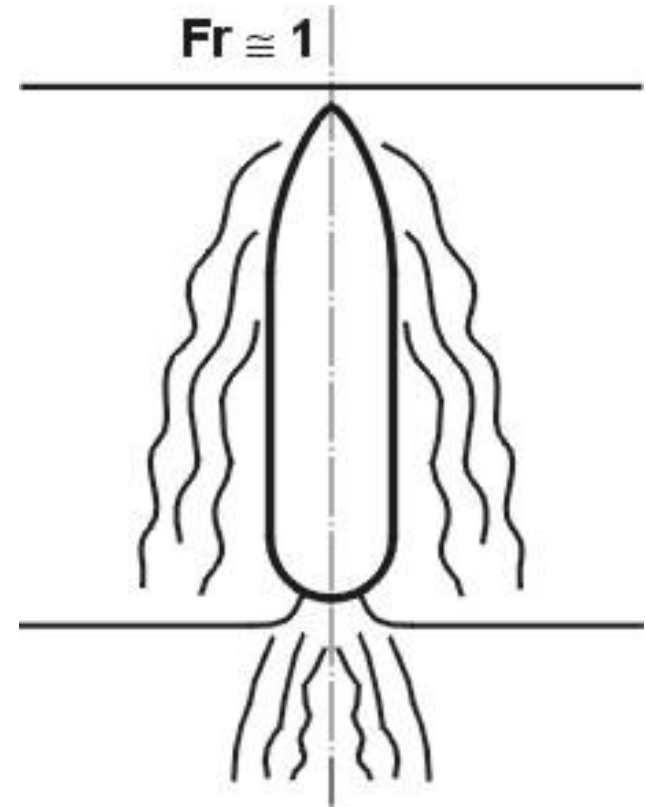
Эти волны называются «**спутные волны**».

# Спутные волны и критическая скорость

Образовавшиеся **спутные** 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.



# Спутные волны и критическая скорость

Скорость распространения волн на глубокой воде может быть определена как:

$$c = \sqrt{\frac{g}{2\pi} \lambda}$$

Но предельная длина волн на мелководье зависит от глубины:

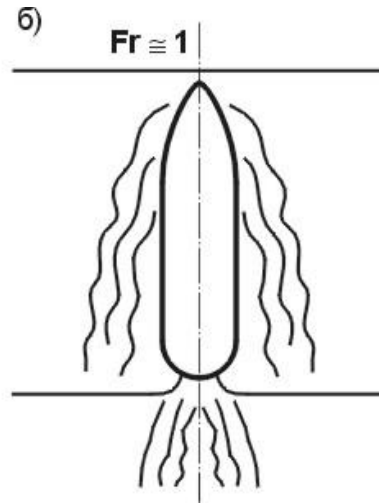
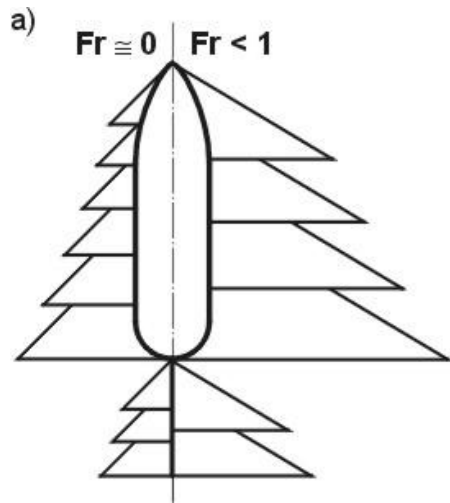
$$\lambda_{кр} = 2\pi * H_{гл}$$

**Если глубина моря ограничивает предельную длину волн, то этим она ограничивает предельно возможную скорость распространения волн:**

$$V_{кр} = \sqrt{gH_{гл}}$$



# Спутные волны и критическая скорость



$$Fr_H = \frac{V_c}{\sqrt{g^* H_{гл}}}$$

Скорость волн, создаваемых движущимся судном, равна скорости судна. Задавая скорость расходящимся волнам судно тем самым задает им и длину.

Достигнув предельной длины для данной глубины волны не могут двигаться быстрее.

Образовавшаяся носовая **спутная волна** имеет настолько большую высоту, что не позволяет судну себя преодолеть и обогнать.

Из-за невозможности судна двигаться быстрее на мелководье скорость, при которой образуются **спутные волны** ( $Fr \approx 1$ ), называют **критической**.

# Спутные волны и критическая скорость

**Спутная волна обладает большой разрушающей силой и представляет опасность для береговых объектов и стенок каналов.**

Для недопущения возникновения спутной волны при плавании на мелководье с неограниченной акваторией, в общем случае судно может следовать со скоростью до:

$$0.8 \sqrt{g * H_{гл}}$$

а при движении в канале скорость не должна превышать:

$$0.5 \sqrt{g * H_{гл}}$$

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

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

# Спутные волны и критическая скорость

Таблица НШС-82 (НШСР-86) соответствует скорости судна

$$V_c \approx 0.4 \sqrt{g^* H_{2л}}$$

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:

$\omega_k / \omega_{\otimes}$	2.5	4	5 - 6
Скорость судна, м/с	$(0.20 \div 0.25) \sqrt{g^* H_{2л}}$	$(0.40 \div 0.50) \sqrt{g^* H_{2л}}$	$0.5 \sqrt{g^* H_{2л}}$