

# Проектирование формы носовой оконечности судна с учётом нагрузок при слеминге

В.А. Постнов, Н.А. Тарануха, С.Д. Чижиумов

## Введение

Известно, что ударные гидродинамические нагрузки в носовой оконечности быстроходных судов существенно зависят от формы обводов. Это обстоятельство необходимо учитывать в процессе проектирования таких судов.

В зависимости от назначения судна и условий его эксплуатации, в качестве критерия проектирования могут приниматься требования к различным параметрам удара о воду. Когда регламентирующим условием является обеспечение общей прочности, целью ставится снижение ударной силы. При необходимости обеспечить в первую очередь местную прочность минимизируются наибольшие давления. Для обеспечения условий обитания экипажа и пассажиров, а также работы оборудования и аппаратуры, устанавливаются требования к ускорениям.

Нагрузка при ударе корпуса судна о воду изменяется во времени. Её снижение можно обеспечить, главным образом, за счёт более равномерного распределения по времени и, по возможности, увеличения времени удара.

Проблема ударных гидродинамических нагрузок актуальна для различных типов судов. Так суда с динамическими принципами поддержания испытывают удары днищем о встречные волны. При выборе формы корпуса таких судов в первую очередь необходимо обеспечить минимум сопротивления в переходном режиме движения и наименьшую силу удара волны в корпус. Первое достигается, главным образом, шириной по скуле, углом подъёма килевой линии, наличием и расположением реданов. Ударная сила определяется формой шпангоутов в носовой и средней части судна [1]. Таким образом, оптимизация формы корпуса на начальных этапах проектирования по условиям ходкости и прочности судна может быть проведена отдельно.

В некоторых случаях критерий ударных нагрузок и ускорений является определяющим при выборе формы всего корпуса. Примерами являются морские гоночные суда [2], сбрасываемые спасательные шлюпки [3,4].

Для водоизмещающих судов функцией цели при проектировании носовых обводов ниже КВЛ является сопротивление воды движению судна. Ограничение по днищевому слемингу определяется минимальной осадкой носом. Снизить ударные нагрузки возможно путём уменьшения площади плоского участка днища в носу, однако этот способ считается практически нереализуемым по целому ряду причин. Тем не менее, следует отметить, что вопрос этот ещё недостаточно изучен. Так, одним из вариантов уменьшения днищевых слемингов может быть применение гофрированного днища в носовой части [5]. При этом исключается плоский удар о воду и увеличивается его демпфирование воздушными подушками, образуемыми между гофрами. Уменьшение нагрузок подтверждается численными экспериментами [5].

У быстроходных водоизмещающих судов в носовой части имеется значительный развал шпангоутов над КВЛ, являющийся причиной бортового слеминга. Основным критерием проектирования формы этой части корпуса является минимум ударной силы при ограничениях на наибольшие давления и ускорения. Кроме формы, оптимизируемыми параметрами могут быть ширина и высота надводного борта, а ограничениями – скорость и ускорение в конце погружения, которые задаются из расчёта условий заливания палубы.

При вычислении гидродинамической силы погружения носовой оконечности судна в зависимости от типа носовых обводов и характера ударов обычно применяются два подхода. Первый основан на использовании закона сохранения импульса [1,4,6,7]. В этом случае задача сводится к погружению носовой оконечности в виде «эквивалентного тела», обладающего начальной скоростью, приведённой массой и длиной поверхности удара. Такой подход хорошо себя зарекомендовал при определении ударов от днищевых слемингов. Тем не менее,

его точность ограничивается условностью и частой неопределённостью значений приведенной длины участка удара и приведенной массы. Особенно эта неопределённость проявляется при отсутствии плоского или малокилеватого днища в носовой оконечности, то есть в задаче о бортовом слеминге. В этом случае процесс погружения более длительный, а протяжённость зоны повышенных нагрузок и её центр (а, следовательно, и приведённая масса) существенно изменяются во времени и не могут быть заранее достоверно определены.

Второй подход основан на выражении ударной нагрузки в виде функции от кинематических параметров качки [8]. При этом, так как процесс качки судна при слеминге является нелинейным, расчёт обычно производится методом последовательных приближений [9]. В первом приближении определяются параметры продольной качки судна на основе линейной теории или с применением обобщённых диаграмм, построенных по результатам систематических экспериментальных исследований [10]. Далее вычисляются гидродинамические давления и ударные силы на носовую оконечность судна. При этом в задаче проектирования может быть оптимизирована форма носовых обводов с целью получения наименьшей ударной силы. Затем выполняются расчёты общей динамической прочности и уточняются параметры качки судна в последующих приближениях.

В данной работе предлагаются способы проектирования формы обводов судна, в том числе с применением численного моделирования процесса погружения носовой оконечности судна при слеминге.

### Аналитические модели

Предположим справедливость гипотезы плоского обтекания. Если, к тому же, пренебречь силами тяжести, плавучести и вязкости, то сила сопротивления при погружении поперечного сечения судна в воду будет определяться только её инерционной составляющей [11]

$$f(t) = \mu \frac{dv}{dt} + v \frac{d\mu}{dt}, \quad (1)$$

где  $\mu$  - присоединённая масса,  $v$  - скорость погружения.

Присоединённая масса может быть представлена в виде [6, 8]

$$\mu(t) = c y^2, \quad c = \frac{1}{2} \pi \rho k_1 k_2 \kappa^2, \quad (2)$$

где  $y(t)$  - полуширина сечения на уровне текущей ватерлинии (без учёта брызговой струи),  $\rho$  - плотность жидкости,  $k_1$ ,  $k_2$  и  $\kappa$  - поправки, учитывающие соответственно форму сечения, пространственность обтекания и подъём свободной поверхности (брызговую струю).

Учтём далее соотношения

$$v = v_0 + at; \quad z = \int_t v dt = v_0 t + \frac{1}{2} at^2, \quad (3)$$

где  $v_0$  - начальная скорость,  $a$  - ускорение,  $z$  - вертикальное перемещение.

С учётом (2) и (3) выражение (1) принимает вид

$$f(z) = c (a y^2 + 2(v_0^2 + 2az)y y'). \quad (4)$$

Отсюда в задаче проектирования получим уравнение

$$\frac{1}{2} k_a y^2 + (1 + 2k_a z)y y' = k_f, \quad (5)$$

где  $k_a = \frac{a}{v_0^2}$ ;  $k_f = \frac{[f]}{2v_0^2 c}$ ;  $y' = \frac{dy}{dz}$ ,  $[f]$  - допустимая нагрузка на единицу длины судна.

Решение уравнения (5) определяет форму поперечного сечения судна при заданных кинематических параметрах погружения.

Рассмотрим задачу проектирования формы сечения при наиболее простом случае погружения с постоянной скоростью  $v_0$ . Тогда из (5) получим  $yy' = k_f$ .

Решение этого уравнения даёт

$$y(z) = \sqrt{2k_f z}. \quad (6)$$

Если задаться целью получения постоянной силы в процессе погружения, то оптимальной формой поперечного сечения будет парабола (6).

Для получения постоянного наибольшего давления в процессе погружения  $p_{\max} = \text{const} = [p]$  воспользуемся формулой Вагнера

$$p_{\max} = \frac{\rho}{2} \left( \frac{dy}{dt} \right)^2.$$

Тогда ординаты сечения определяются в виде

$$y(z) = \frac{1}{v_0} \sqrt{\frac{2[p]}{\rho}} z. \quad (7)$$

Таким образом, получаем клин с постоянной килеватостью.

Формулы для некоторых случаев, в частности, при постоянном ускорении  $a = \text{const} = [a]$ , получены также в работе [4]. Так, если воспользоваться законом сохранения импульса при погружении

$$m v_0 = (m + \mu) v, \quad (8)$$

где  $m$  – приведённая масса судна на единицу длины, то с учётом (2) и (3) получим [4]

$$y(z) = \sqrt{\frac{m}{c} \left( \frac{1}{\sqrt{1 + 2[a]z v_0^{-2}}} - 1 \right)}. \quad (9)$$

На рис. 1 приведен пример сечения, полученного по формуле (9).

Таким образом, в ряде случаев погружения можно достаточно просто получить оптимальные формы поперечных сечений на основе теории Вагнера. Следует, однако, помнить, что в основе приведенных зависимостей лежат существенные допущения теории и приближённая формула (2) для вычисления присоединённых масс. Это может привести к значительным погрешностям при получении оптимальных форм с большими углами килеватости и при погружении с невысокими относительными скоростями, что характерно, в частности, для бортового слеминга судов.

### Численная модель погружения

Как и в аналитической модели будем считать здесь также справедливым допущение о плоском обтекании. Жидкость полагается идеальной и несжимаемой, а судно – жёстким. Движение судна задаётся либо определяется из совместного решения уравнений движения судна и жидкости. В случае свободного падения уравнение движения судна имеет вид

$$M \dot{v} + \int \int_{x s} p(x, s, t) \cos(n, z) dx ds = M g, \quad (10)$$

где  $M$  – приведённая масса судна,  $x$  – продольная координата,  $s$  – криволинейная координата по контуру поперечного сечения судна,  $n$  – нормаль к контуру. Давления на смоченную поверхность судна определяются интегралом Лагранжа:

$$p = \rho g z + \rho \frac{\partial \varphi}{\partial t} + \frac{\rho}{2} v_f^2, \quad (11)$$

где аппликата  $z$  отсчитывается от свободной поверхности жидкости,  $\varphi$  – потенциал скорости частиц жидкости,  $v_f$  – скорость частиц жидкости.

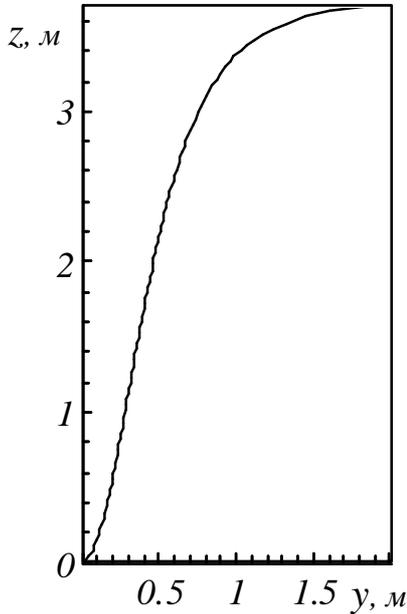


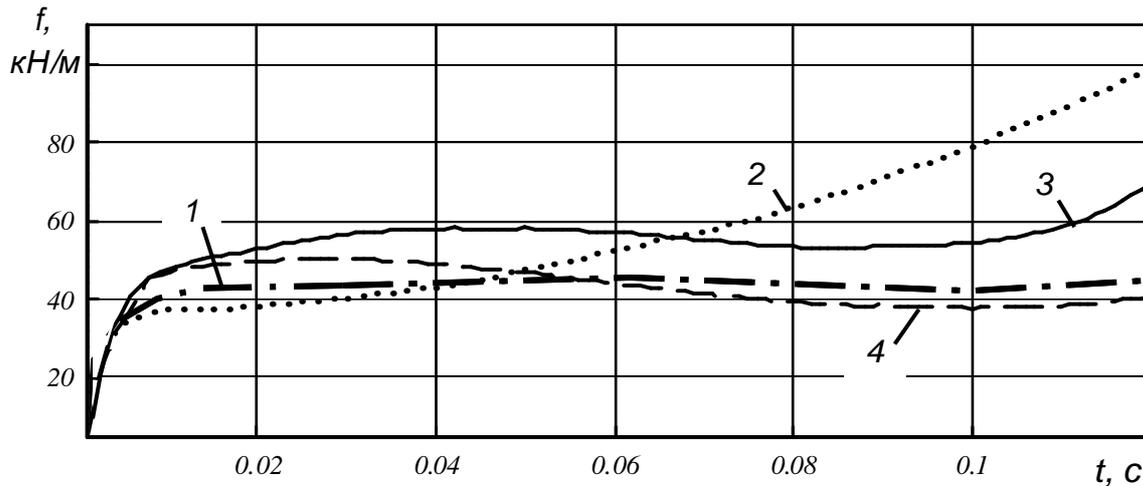
Рис. 1. Сечение, обеспечивающее постоянную перегрузку:  $a = -4g$ ;  $m = 0.725$  т/м;  $v_0 = 17.15$  м/с

Численная модель процесса погружения основана на совместном пошаговом решении уравнений движения судна и жидкости. Течение жидкости в поперечных сечениях в каждый момент времени определяется решением краевой задачи для уравнения Лапласа методом граничных элементов (МГЭ). На основе этого решения на каждом временном шаге переопределяются смоченная поверхность тела и свободная поверхность жидкости, пересчитываются кинематические и динамические параметры взаимодействия [12].

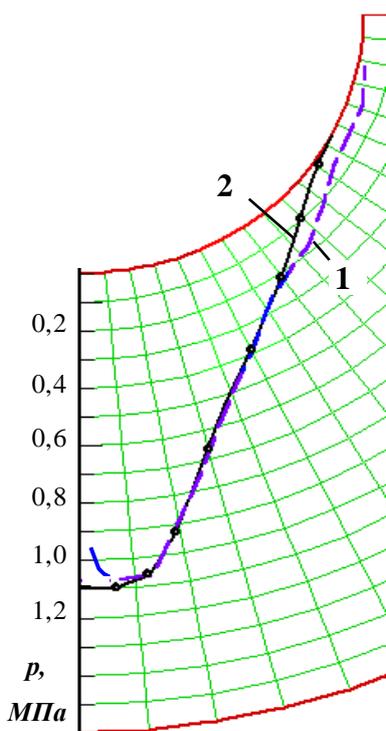
Таким образом, в модели погружения учитываются все инерционные и гравитационные силы, а также деформация свободной поверхности жидкости.

Было проведено тестирование численной модели на задачах о погружении в жидкость различных тел с постоянной скоростью [12]. Результаты расчётов хорошо согласуются с аналитическими решениями.

На рис. 2 приведено изменение гидродинамической силы для сечения, показанного на рис. 1 при  $v_0 = 17,15$  м/с.



**Рис. 2.** Изменение силы погружения при постоянном замедлении ( $a=-4g$ ): 1 – решение по формуле (4); 2 – по методу конечных разностей [4]; 3 – по МГЭ; 4 – по МГЭ при свободном падении ( $m = 725$  кг/м)



**Рис. 3.** Огибающая наибольших давлений при погружении цилиндра. 1 – эксперимент (Н.А. Иванов [5]); 2 – расчёт по МГЭ

Отличие решений, полученных по формуле (4) и по МГЭ (кривые 1 и 3 на рис. 2), связаны в основном с приближённостью коэффициентов  $k_1$  и  $k$  в формуле (2), а также влиянием скоростного и гидростатического давлений, учитываемых в численной модели (в формуле (11)). Впадина на кривых 3 и 4 соответствует моменту погружения точек контура в районе максимума угла килеватости.

На рис. 3 приведено сравнение результатов численного и модельного экспериментов по сбрасыванию на воду кругового цилиндра радиусом 0,447 м с начальной скоростью удара 7.67 м/с [5].

В следующем примере рассмотрен удар волны в нос корпуса судна на подводных крыльях «Ракета». Расчётное сечение представляет собой клин с переменным углом килеватости (от  $25^\circ$  в ДП до  $15^\circ$  в районе скулы). Пример расчёта ударной силы по методу Вагнера – Повицкого приведён в книге [6].

На рис. 4 представлены зависимости ударной силы от времени. Результаты, полученные по МГЭ и по методике, приведённой в [6], хорошо согласуются между собой при учёте сил веса ( $g = 0$ ).

Движение клина в теории Вагнера, в каждый момент времени трактуемое как удар, описывается уравнением со-

хранения импульса (8), справедливым лишь в отсутствие внешнего поля. В результате не учитываются гравитационные силы, действующие как на жидкость, так и на погружаемое тело.

Неучёт весомости жидкости возможен только при больших скоростях погружения. То же самое можно сказать в отношении весомости тела. В данном примере расчёт в соответствии с уравнениями (10) и (11) даёт гораздо большую гидродинамическую силу, чем по методике [6], основанной на применении уравнения (8). Таким образом, при расчёте слеминга судна учёт сил веса необходим.

Движение клина в теории Вагнера, в каждый момент времени трактуемое как удар, описывается уравнением сохранения импульса (8), справедливым лишь в отсутствие внешнего поля. В результате не учитываются гравитационные силы, действующие как на жидкость, так и на погружаемое тело. Неучёт весомости жидкости возможен только при больших скоростях погружения. То же самое можно сказать в отношении весомости тела. В данном примере расчёт в соответствии с уравнениями (10) и (11) даёт гораздо большую гидродинамическую силу, чем по методике [6], основанной на применении уравнения (8). Таким образом, при расчёте слеминга судна учёт сил веса необходим.

### Проектирование формы с применением численного моделирования

Для проектирования формы шпангоутов судна на нагрузки при ударах о воду предлагается следующий алгоритм (рис. 5,а). На основе обобщённых статистических диаграмм оцениваются параметры движения носовой оконечности судна при качке, определяется целевая функция и ограничения. Далее с использованием приближённых аналитических зависимостей определяется начальная форма сечений судна. Параметры движения могут быть получены также в результате расчёта линейной качки судна. При этом исходная форма корпуса определяется прототипом.

Следующим этапом является проектирование формы поперечных сечений судна в носу на основе численного моделирования процесса погружения. Полученная форма используется далее в расчётах нелинейной качки (с учётом слеминга) и динамической прочности судна. По результатам этих расчётов может потребоваться изменение ограничений на форму носовой оконечности и дальнейшее её уточнение.

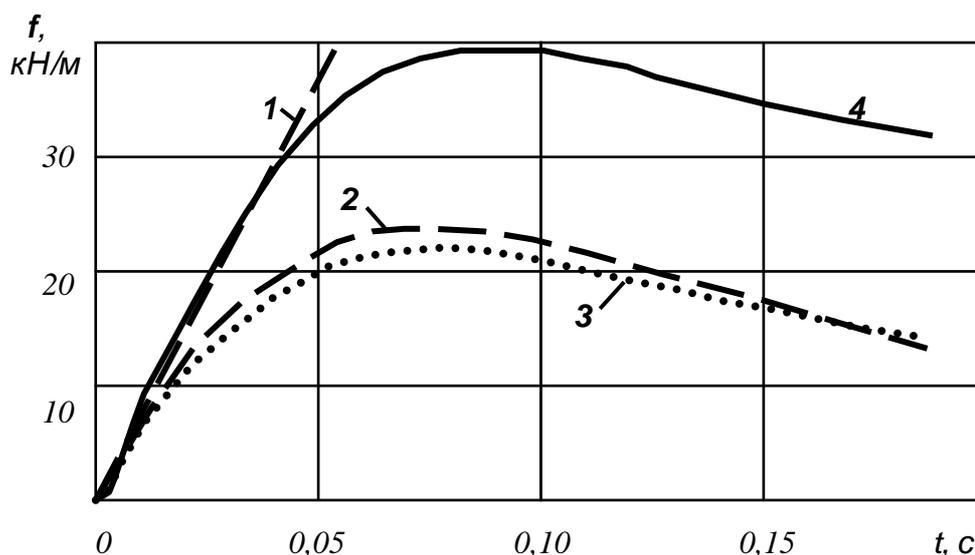


Рис. 4. Сила от удара волны в носовое сечение «Ракеты». 1 – по формуле Вагнера – Повицкого при постоянной скорости; 2 – по методике [6]; 3 – по МГЭ; 4 – по МГЭ с учётом гравитационных сил

Проектирование формы сечения на основе численных моделей может быть выполнено по двум различным алгоритмам. Первый способ состоит в последовательном анализе погружения различных вариантов формы. Для каждого варианта проверяется достижение цели и удовлетворение ограничений, а затем производится определение формы для следующего приближения (рис. 5, б).

Во втором алгоритме форма поперечного сечения оптимизируется в результате одного численного расчёта, в котором на каждом временном шаге процесса погружения определяется очередная точка сечения на ватерлинии, соответствующей данному моменту времени. Таким образом, на текущем шаге известны координаты точек только подводной части сечения. Следующая точка определяется с помощью итераций, с учётом условия оптимальности и ограничений (рис. 5, в).

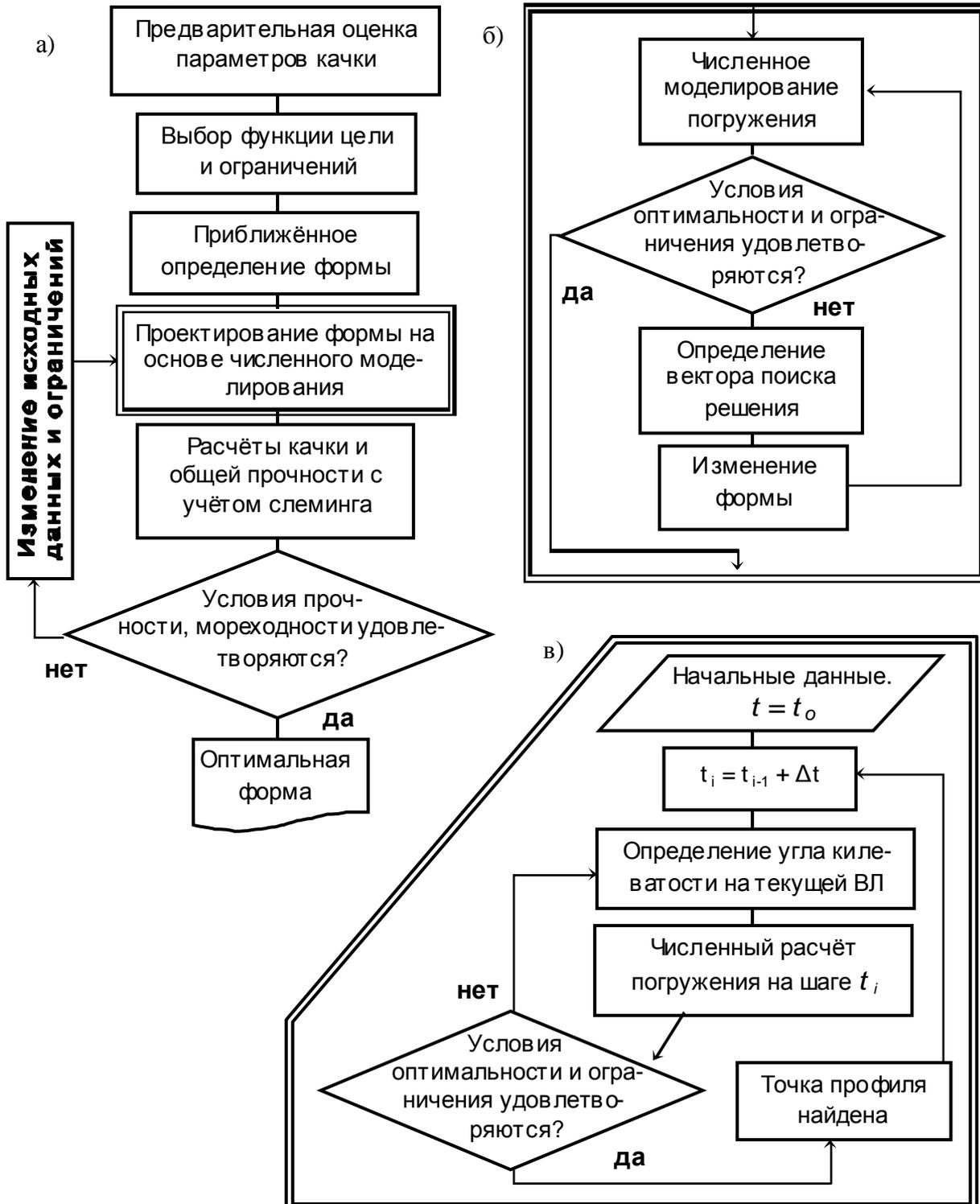


Рис. 5. Алгоритм проектирования формы шангоутов на нагрузки при слеминге: а) общая блок-схема; б) оптимизация на основе численного анализа вариантов сечения; в) оптимизация сечения в процессе погружения

Возможности предлагаемой методики иллюстрирует пример оптимизации формы надводной части носовой оконечности контейнеровоза длиной 157 м. В качестве исходной формы

приняты обводы контейнеровоза «Художник Сарьян». Расчётная амплитуда вертикальных колебаний носовой оконечности, определенная по обобщённым диаграммам [10], для волнения 8 баллов составляет 11 м. Для района первого теоретического шпангоута амплитуда скорости погружения составляет 7 м/с, а амплитуда ускорения – 4,4 м/с<sup>2</sup>.

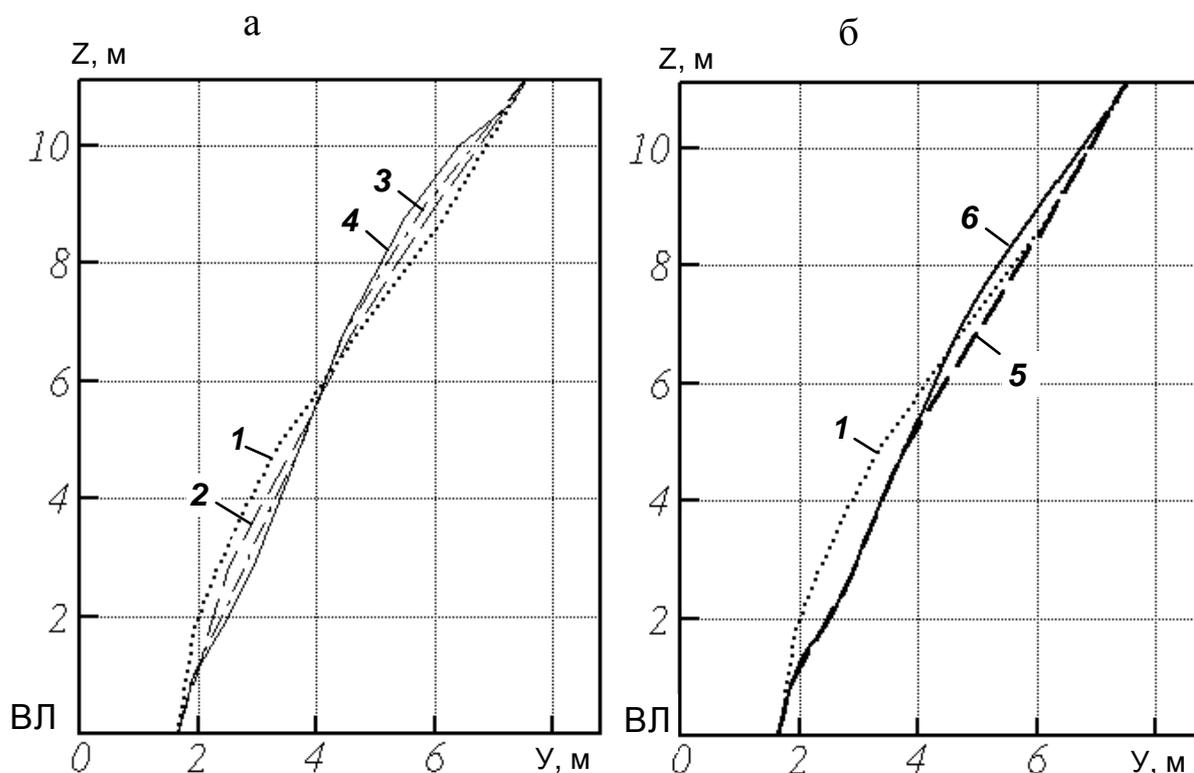
Проектирование по критерию минимума ударной силы проводилось в соответствии с алгоритмом на рис. 5, б. Численно моделировался процесс погружения от уровня КВЛ до кромки палубы.

На рис. 6,а приведены варианты формы надводной части первого теоретического шпангоута, полученные в процессе оптимизации при условиях, что наибольшая ширина и площадь каждого шпангоута остаются неизменными. Соответствующие распределения по времени ударной силы и наибольшего давления показаны на рис. 7,а и 8,а. На рис. 6-8 под пунктом б отражены результаты, полученные при отсутствии ограничения по площади шпангоута.

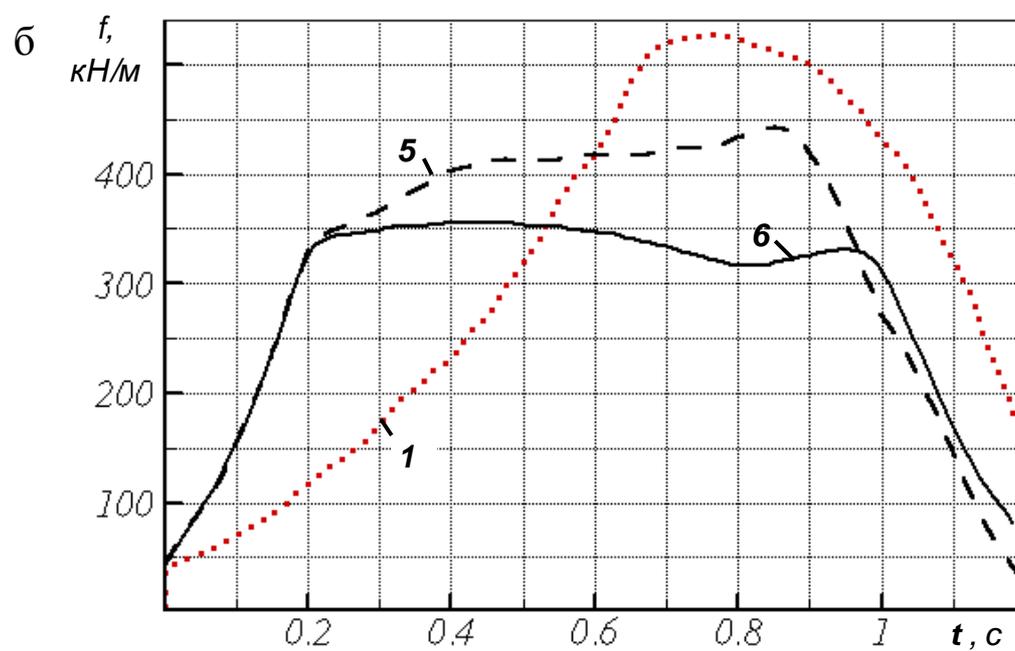
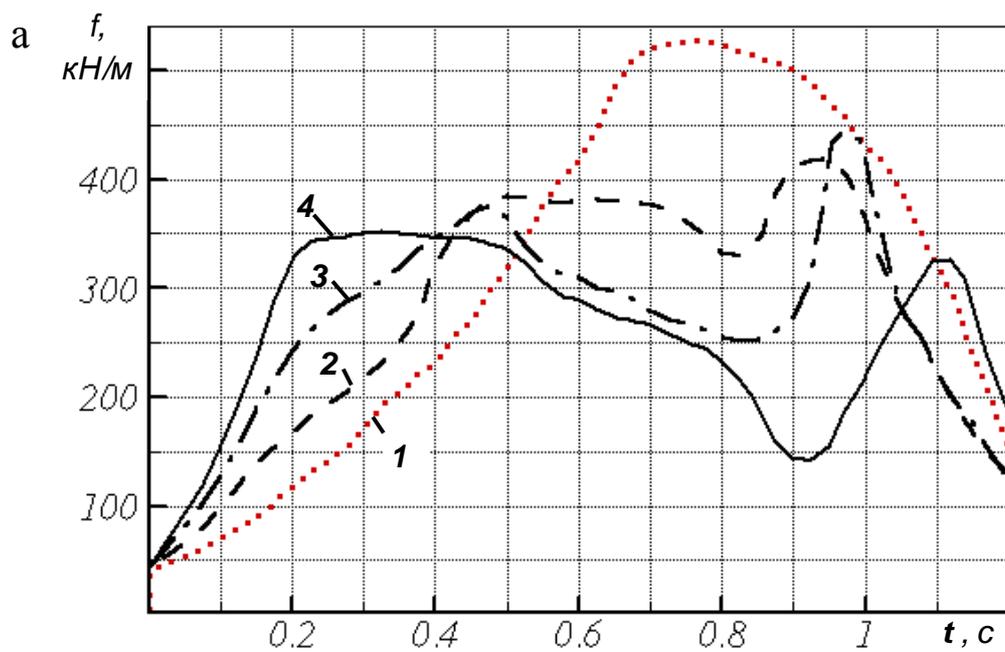
Как видно на рис. 6,а и 9, при условии неизменности площади шпангоута его оптимальная форма имеет несколько точек перегиба, а зависимости  $f(t)$  и  $p_{max}(t)$  имеют два «горба». Они связаны с «приполнением» шпангоута в нижней и верхней частях надводного борта. Повышенные давления чуть выше КВЛ приводят к меньшему пику ударной силы, чем в исходном варианте, так как они действуют на меньшую поверхность. Второй пик нагрузки (от увеличения развала борта в верхней части) также меньше, чем в исходном варианте, - в связи с заметным замедлением погружения к этому моменту времени.

При ослаблении ограничений на площадь шпангоутов можно получить более равномерное по времени распределение ударной силы, а также более гладкие обводы (рис.6,б и 7,б).

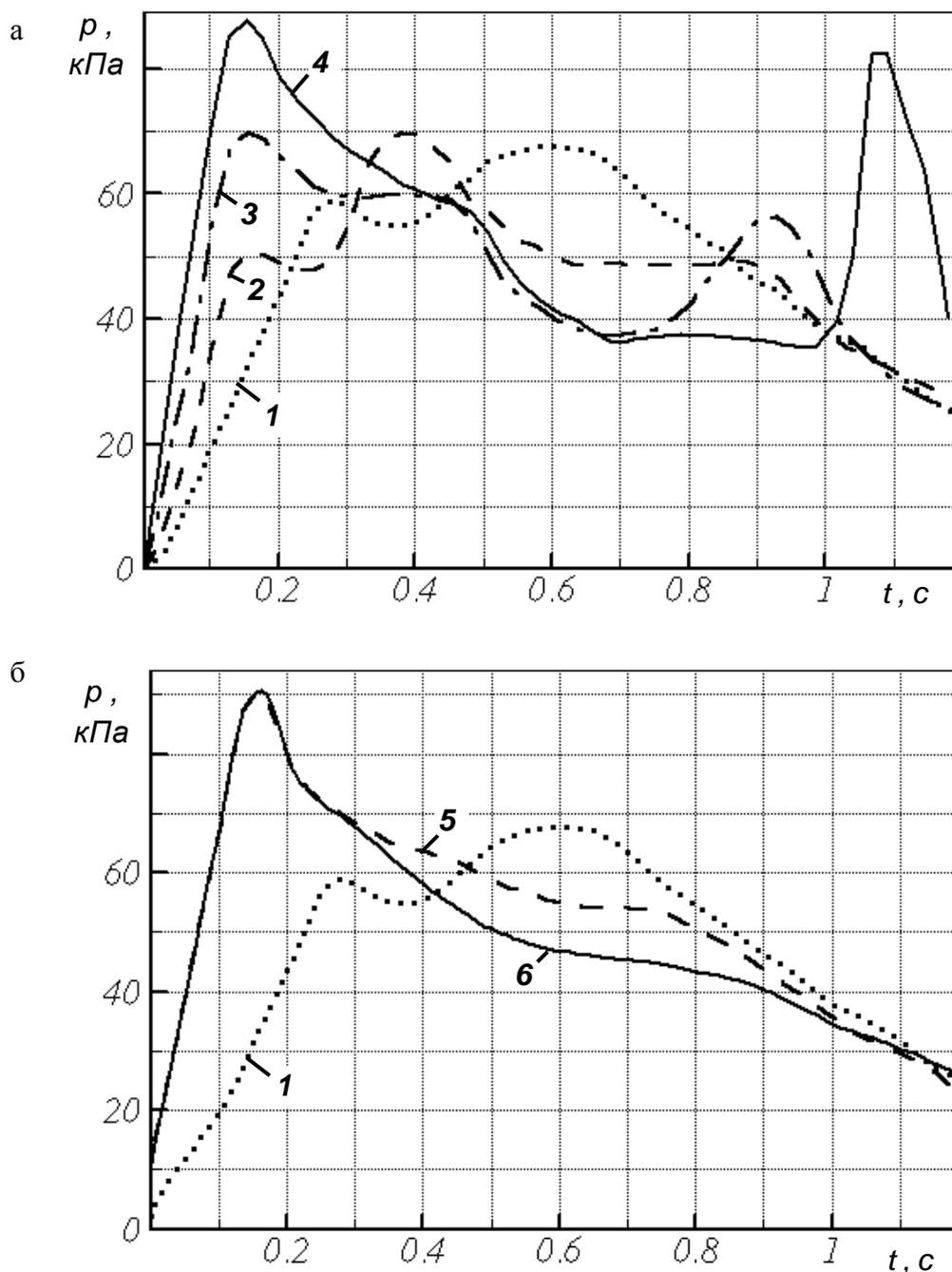
Для шпангоутов, спроектированных по условию минимума ударной силы, максимальные давления несколько повышаются. Следует, однако, иметь в виду, что расчётные давления (для оценки местной прочности) следует определять при анализе других режимов качки судна. В данном случае давления не являются определяющими.



**Рис. 6.** Варианты формы надводной части первого теоретического шпангоута: а) с условием неизменности площади шпангоута; б) без ограничения по площади; 1 – исходная форма; 2, 3, 5 – промежуточные варианты; 4, 6 – оптимизированные формы



**Рис. 7.** Изменение ударной силы:  
 а) для шпангоутов на рис. 6,а; б) для шпангоутов на рис. 6,б



**Рис. 8.** Изменение наибольших давлений  
 а) для шпангоутов на рис. 6,а; б) для шпангоутов на рис. 6,б

Оптимизация формы была выполнена для нескольких шпангоутов. На рис. 9 изображены носовые части корпуса исходного и оптимизированного (при неизменной площади шпангоутов) вариантов. Ударная сила оптимизированного варианта уменьшилась, по сравнению с исходным, на 21%. Заметим, что форма подводной части судна не изменялась, поэтому ходкость судна на тихой воде осталась прежней.

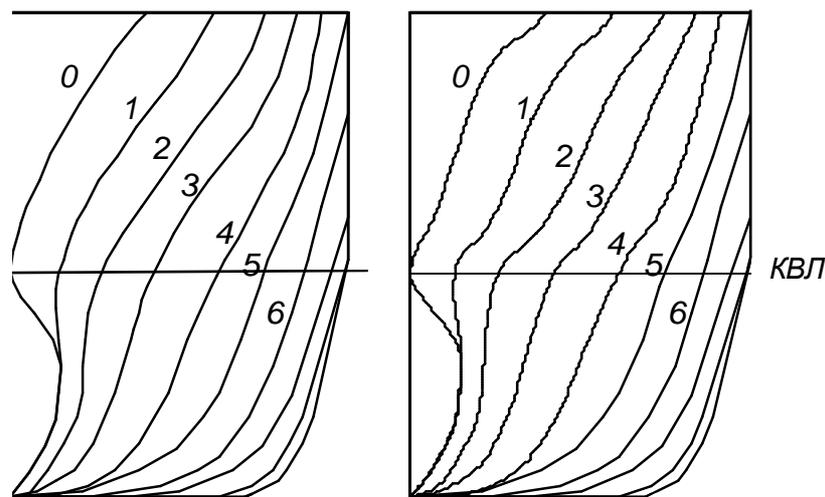
### Заключение

На основе численного моделирования процесса погружения разработана методика проектирования обводов носовой оконечности судов по условиям нагрузок при слеминге. Результаты численного моделирования погружения на основе МГЭ хорошо согласуются с аналитическими решениями и с экспериментом (рис. 2, 3). Применение численных моделей позволяет провести более полный анализ гидродинамических нагрузок по сравнению с традиционными методиками расчётов. При этом возможен учёт и анализ влияния ре-

альной формы шпангоутов, гравитационных сил, подъёма свободной поверхности, скоростного напора. При ударе о воду поверхностей с малым углом килеватости возможен учёт влияния на ударные нагрузки воздушной прослойки [5,12]. В настоящее время разрабатывается программное обеспечение для решения пространственной задачи.

Изменение формы шпангоутов позволяет существенно (на 20%) уменьшить ударную силу, несколько распределяя её по времени. Эффект может быть ещё больше, если снять или ослабить ограничения о неизменности наибольшей ширины и площади шпангоутов.

Для уменьшения изгибающего момента, включающего волновую и ударную составляющие, может иметь существенное значение период действия ударной нагрузки. При проектировании формы обводов это обстоятельство также может быть учтено. Так, например, продолжительность удара в вариантах форм 1 и 4 (рис. 6) различается, так как за один отрезок времени в варианте 1 нагрузка имеет один пик, а в варианте 4 - два (см. рис. 7,а).



**Рис. 9.** Носовая часть корпуса контейнеровоза:  
а) исходный вариант; б) оптимизированный вариант

### Литература

1. Колызаев Б.А., Косоруков А.И., Литвиненко В.А. Справочник по проектированию судов с динамическими принципами поддержания. – Л.: Судостроение, 1980.
2. Курбатов Д.А. За «Голубой лентой» на катере // Человек, море, техника. – Л.: Судостроение, 1989.
3. Иванов Н.А., Лапин В.Г. Модельный эксперимент с ныряющей спасательной шлюпкой // Сб. НТО им. акад. А.Н. Крылова: Повреждения и эксплуатационная надёжность судов Дальневосточного бассейна, 1986, вып. 15.
4. Arai M., Cheng L.Y. Optimal Design of Bow Sections Considering Slamming Characteristics // TEAM 97, Singapore, 1997.
5. Ivanov N.A., Chizhiumov S.D. Regulating of Slamming Loads at Design of a Bottom in Ship Bow // TEAM 2000, Vladivostok, 2000.
6. Матгес Н.В., Уткин А.В. Прочность судов на подводных крыльях. – Л.: Судостроение, 1966.
7. Вешуткин В.Д. Ударные нагрузки, возникающие при слеминге судов смешанного плавания // Механика разрушения и надёжность судовых конструкций. – Горький: ГПИ, 1987.
8. Короткин Я.И., Рабинович О.Н., Ростовцев Д.М. Волновые нагрузки корпуса судна. – Л.: Судостроение, 1987.
9. Осипов О.А. Изгибающие моменты, действующие на корпус судна при ударе волн в развал бортов // Прочность корпуса и защита судов от коррозии. – Л.: Транспорт, 1985.
10. Платонов В.Г. Обобщённые диаграммы относительных колебаний носовой оконечности судна на встречном нерегулярном волнении // Судостроение, 1980, № 9.
11. Егоров И.Т., Соколов В.Т. Гидродинамика быстроходных судов. – Л.: Судостроение, 1971.
12. Чижумов С.Д. Численные модели в задачах динамики судна. – Владивосток: Изд-во Дальневост. ун-та, 1999.