

УДК 629.5.017.21+015.5

DOI: 10.31653/2306-5761.31.2021.114-129

## SHIP'S ACCELERATIONS DUE TO VIBRATION UNDER SLEMING CONDITIONS ON IRREGULAR WAVE

### ВИБРАЦИОННЫЕ УСКОРЕНИЯ, ДЕЙСТВУЮЩИЕ НА СУДА В УСЛОВИЯХ СЛЕМИНГА НА НЕРЕГУЛЯРНОМ ВОЛНЕНИИ

A. Serdyuchenko, DSc, professor

А.Н. Сердюченко, д.ф.-м.н., профессор

Digital Marine Technology, Ukraine

Диджитал Марин Технолоджи, Україна

#### ABSTRACT

*Analysis of the problem and practical approach in the calculations of the high frequency accelerations due to ship slamming in irregular sea waves are considered. Slamming has a negative effect on ship's operating modes and transporting cargo under stormy conditions and this is one of the reasons why navigators are forced to reduce speed or change ship's heading angle when wave height increasing. Ship's hull shaking and its vibration due to slamming is a reason of undesirable inertial effects on the instrument, system, hull structural components and cargo being transported. In addition, the elastic hull oscillations, superimposed on the ship motion cycles, will reduce ship's service life and fatigue strength.*

*The problem is formulated within the model of a heavy ideal and incompressible fluid. Total hydrodynamic pressure acting on the hull is determined by the well-known Cauchy-Lagrange integral when ship's bow immersing under oncoming wave. This approach includes calculation techniques for the estimation of the impact loads on ship bow due to slamming and calculation of ship-hull-guider vibration response under the action of these loads. Corresponding techniques are elaborated for the estimation of high frequency component of accelerations and inertial loads, acting on the ship structures during the operations in irregular waves on short-term time intervals. It is focused on level of vibrating accelerations hull structures component estimation under irregular wave quasi-stationary intervals.*

*It is demonstrated that bottom slamming loads are more intense and shorter-term than subsequent side slamming one. However, the latter are usually more energy-intensive and therefore can cause more intense vertical elastic hull oscillations after impact. At the same time there are the first four beam forms of oscillations but, the first one is the most energy-intensive. It is proved that the principal coordinates method is quite suitable for slamming problem solution and corresponding practical estimation calculations.*

**Keywords:** sea-going ships, irregular waves, slamming.

#### РЕФЕРАТ

*Розглянуто проблеми і практична методика розрахунку вібраційних прискорень в корпусах транспортних суден, що виникають при слемінгу на зустрічних курсових кутах до морського нерегулярного хвилювання. Слемінг чинить негативний вплив на режими експлуатації суден і вантажі які перевозяться в штормових умовах і це є однією з причин, за якими судноводії змушені знижувати швидкість або змінювати курс руху судна зі зростанням інтенсивності хвилювання. Струс корпусу судна і його вібрація при слемінгу надаватимуть небажані інерційні впливу на приладову, системну та конструктивну частини корпусів суден і вантажів, що перевозяться. Крім того, пружні коливання корпусу, накладаючись на цикли від хитавиці, будуть знижувати ресурс втомної міцності судових конструкцій.*

*Проблема формулюється в межах моделі важкої ідеальної і нестисливої рідини. Повний гідродинамічний тиск, що діє на обшивку корпусу при зануренні носової частини судна під зустрічну хвилю визначається відомим інтегралом Коши-Лагранжа. Методика містить розрахунок гідродинамічного навантаження, що виникає при ударі носової частини судна о хвилю та розрахунок загальної пружної реакції корпусу на дію навантаження. Вона орієнтована на оцінку рівнів вібраційної складової прискорень, судових конструкцій на інтервалах квазістаціонарних режимів нерегулярного хвилювання.*

*Продемонстровано що ударні навантаження від слемінгу днища в більш інтенсивні і більш короткострокові, ніж наступні за ними навантаження від бортового слемінгу. Однак останні, як правило, є більш енергоємними і тому здатні викликати більш інтенсивні пружні коливання корпусу в вертикальній площині після удару. При цьому виникають перші чотири балкові форми коливань корпусу, перша з яких є найбільш енергоємною. Доведено що при вирішенні практичних завдань метод головних координат є цілком придатним для розрахунків.*

**Ключові слова:** морські судна, нерегулярне хвилювання, слемінг.

### **Постановка проблемы в общем виде и ее связь с важными научными и практическими задачами**

Слеминг (от английского слова to slam – шлепать) представляет собой физическое явление удара вышедшей из воды носовой оконечности судна о встречную волну с последующим сотрясением корпуса и его упругими затухающими колебаниями по балочным формам в вертикальной плоскости. Явление слеминга имеет место в реальных условиях морского нерегулярного волнения практически для судов любой длины, если только интенсивность волн достаточно большая, чтобы продольная качка судна сопровождалась оголением носовой части корпуса. Различают слеминг днищевой, когда происходит резкий удар о воду плоским участком носовой части днища, и слеминг бортовой, когда происходит последующее быстрое погружение в волну развалов борта в надводной части носовой оконечности корпуса судна [7]. При этом удар сопровождается интенсивным брызгообразованием, рис. 1.



*Рис. 1. Удар сопровождается интенсивным брызгообразованием при днищевом слеминге*



*Рис. 2. Значительные повреждения корпуса в носовой оконечности при бортовом слеминге*

Слеминг оказывает отрицательное воздействие на режимы эксплуатации судов и перевозимые грузы в штормовых условиях и это является одной из причин, по которым судоводители вынуждены снижать скорость или изменять курс движения судна с возрастанием интенсивности волнения. Сотрясения корпуса судна и его вибрация при слеминге будут оказывать нежелательные инерционные воздействия на приборную, системную и конструктивную части корпусов судов и перевозимых грузов. Кроме того, упругие колебания корпуса, накладываясь на циклы от качки, будут снижать ресурс усталостной прочности судовых конструкций. Например, при характерных значениях периодов продольной качки и вибрации корпуса судна и интервалов времени между ударами

[7, 8] за один день перебування в зоні шторма судно набирає приблизно по  $(1,2 - 1,5) \cdot 10^4$  циклів напружень в конструкціях, як от качки, так і от слемінга.

Отметим также, что местные гидродинамические нагрузки от слеминга могут вызывать серьезные повреждения пластин обшивки и набора в носовой оконечности (вмятины, трещины, потери устойчивости набора и даже разрушения носовой оконечности [9,10], рис.2). Это в свою очередь приводит к выводу из эксплуатации и дорогостоящему докованию судов для внепланового ремонта и замены поврежденных конструкций.

История интенсивного изучения слеминга судов на волнении началась примерно с середины первой половины прошлого столетия и насчитывает многие сотни, если не тысячи публикаций в периодической литературе, посвященной данной проблеме. Показательными в этом отношении являются обзорно-аналитические четырехгодичные отчеты подкомитетов по волновым нагрузкам Международных Конгрессов по Судостроению (ISSC в англоязычной аббревиатуре) [11]. Однако следует признать, что до исчерпывающего изучения этого явления еще достаточно далеко и, в частности, в одном из последних отчетов ISSC было высказано утверждение, что вряд ли следует надеяться на исчерпывающее решение проблемы слеминга в обозримом будущем.

### **Анализ последних исследований и публикаций, в которых начато решение данной проблемы и выделение нерешенных ранее частей общей проблемы**

Проблема расчета слеминга естественным образом расщепляется на решение трех основных задач [7, 11]:

- 1) определение гидродинамических нагрузок при ударе днищем и последующем погружении носовой части корпуса в волну;
- 2) определение динамических реакций корпуса судна на действие ударной нагрузки от слеминга (со временем действия в доли секунды);
- 3) определение вероятностных характеристик слеминга на нерегулярном волнении, например, интенсивности и частоты ударов, корреляции с волновыми воздействиями и пр.

При движении судна в условиях волнения, судовые конструкции и грузы будут испытывать два вида инерционных нагружений – низкочастотные нерегулярные нагрузки с периодами в 7 – 9 с от продольных видов качки и 14 – 16 с от поперечных видов качки судна и высокочастотные вибрационные нагрузки с периодами порядка 0,6 – 0,8 с от вертикальных упругих колебаний корпуса судна при слеминге (ударе о волны носовой части корпуса). Кроме этого, при недостаточной жесткости конструкций грузовых палуб и платформ корпуса судна, потенциально возможен также высокочастотный фон инерционных нагружений от местной вибрации перекрытий на некоторых режимах работы силовой установки судна на ходу.

Методика расчета и оценки низкочастотных инерционных нагрузок от качки судна была рассмотрена в работе автора [1]. Также в работе [2] внимание было уделено статистике ветро-волновых режимов на маршруте движения судна через Черное и Средиземное моря и Экваториальную Атлантику, определяющих интенсивность режимов качки и слеминга судна на этом маршруте. Оценки показали, что в зависимости от режима волнения, курсового угла и скорости движения судна возможные уровни ускорений от качки могут достигать значений  $(0,4 - 0,8) g$ . С другой стороны, данные натурных измерений вибрации судов длиной в 50 – 80 м в условиях слеминга указывают на вибрационные ускорения в диапазоне  $(0,8 - 1,5) g$  [3–5]. Для судов длиной в 200 – 250 м этот диапазон вибрационных ускорений от слеминга снижается до значений  $(0,3 - 0,5) g$  [6]. Таким образом, уровни высокочастотных ускорений, возникающих при слеминге судов на волнении, соизмеримы с уровнями ускорений при продольной качке судна.

## Формирование цели работы и постановка задач исследования

Целью работы является анализ проблемы слеминга, существующих методов расчета ударной нагрузки и общей упругой реакции судна при слеминге на волнении и разработка на этой основе приближенной методики расчета вибрационных ускорений, действующих на корпуса судов и грузы в условиях движения на квазистационарных режимах нерегулярного волнения.

### Изложение основного материала исследования с полным обоснованием полученных научных результатов

#### 1. Общая характеристика проблемы слеминга судов на волнении.

Основные трудности в исследовании слеминга связаны главным образом с решением первой и третьей задач и обусловлены они главным образом следующими обстоятельствами. Во-первых, для расчета гидродинамической нагрузки приходится рассматривать сильно нелинейные и нестационарные процессы погружения тел в жидкость с образованием и разрушением струйных течений на свободной поверхности. Во-вторых, результирующие зависимости оказываются многопараметрическими и чувствительными к факторам второго плана, как, например, упругость конструкции, возможное образование воздушно-водяной подушки, локальная нерегулярность волновой поверхности, фазовые соотношения для волн и качки и пр., которые трудно контролировать и прогнозировать как в расчетах, так и при проведении экспериментов. И, в-третьих, существенной является вероятностная природа явления слеминга не только из-за нерегулярности волнения, но и в силу большого числа параметров, плохо поддающихся контролю и оценке.

Первые существенные результаты по слемингу были получены еще в 20-30-е годы прошлого столетия в работах Ван-Кармана и Вагнера при решении краевой задачи о погружении клиньев в жидкость (в связи с посадкой гидросамолетов на воду) [7, 12]. Форма клина позволяла применять автомодельные формы решения задачи, которые затем были обобщены в работах Логвиновича, Сагомояна и др. [12, 13]. Была выявлена квадратичная зависимость максимального ударного давления при слеминге от скорости соударения  $p_{sl}^{\max} \sim k_{sl} v^2$ , локализованного в районе пересечения волновой поверхности и контура. Значительные усилия в исследовании слеминга были предприняты в 70-80-е годы прошлого столетия японскими исследователями в связи с серьезными повреждениями носовых оконечностей скоростных контейнеровозов и крупнотоннажных балкеров от слеминга [9, 10]. Были проведены большие объемы модельных испытаний [14–16] и натурных экспериментов [5, 17], а в теоретических исследованиях были использованы асимптотические [18–20] и численные методы, в частности, метод граничных элементов (МГЭ) [14, 21–23]. В большинстве случаев эти работы также были связаны с погружением клиньев в невозмущенную жидкость и полученные результаты, в общем, подтвердили корректность приближенных автомодельных решений, а также выявили и их слабые места. В частности, оказались завышенными расчетные оценки для максимальных гидродинамических давлений  $p_{sl}^{\max}$ , см. рис. 3 из работы [16], где кривая 1 – расчет давления во времени по Вагнеру, штриховая кривая 2 – расчет МГЭ и кривая 3 – данные модельного эксперимента. Также на рис. 4 показана зависимость коэффициента пропорциональности  $k_{sl}$  от угла килеватости  $\gamma_k$  при малых его значениях (с обозначениями рис. 3) [14]. При значениях  $\gamma_k \leq 3^\circ$  в экспериментальных данных (кривая 3) демпфирующую роль начинала оказывать воздушно-водяная подушка, образующаяся при ударе.

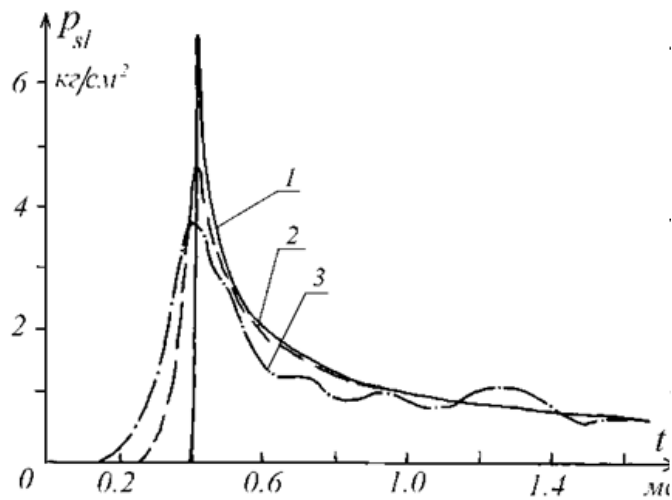


Рис. 3. Завышенные расчетные оценки для максимальных гидродинамических давлений  $p_{sl}^{\max}$

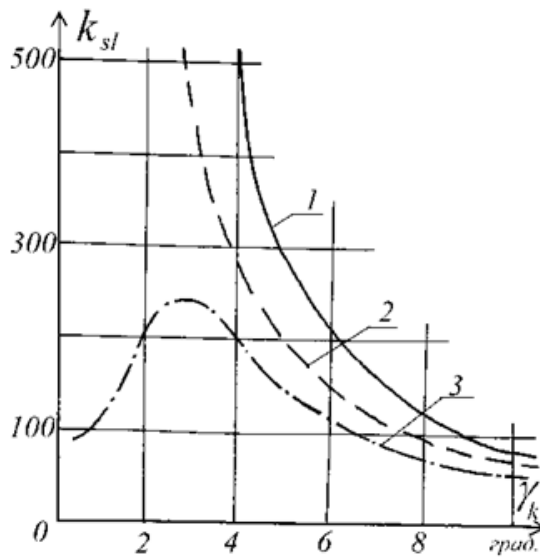


Рис. 4. Зависимость коэффициента пропорциональности  $k_{sl}$  от угла килеватости  $\gamma_k$  при малых его значениях

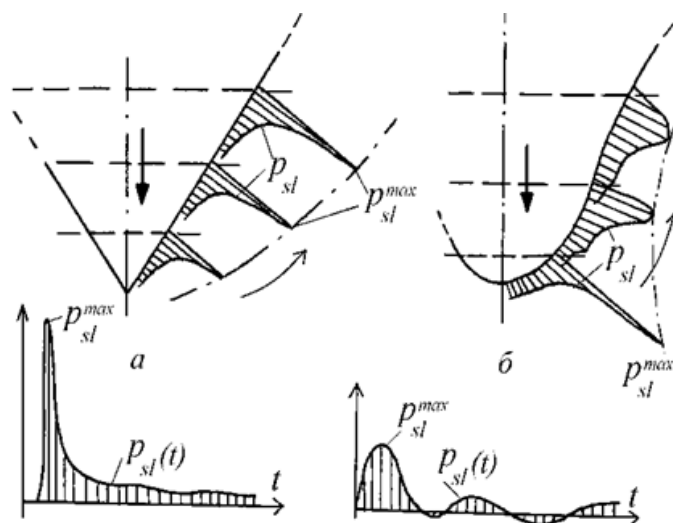


Рис. 5. Зависимость давления  $p_{sl}$  от времени и по длине контура

Для реальных судовых контуров в носовой оконечности зависимость давления  $p_{sl}$  от времени и по длине контура оказывается сложнее, чем для клиньев (см. рис. 5), так что

результаты для клиньев применимы только в первые моменты удара днищем судна о воду [19]. Поэтому в большинстве предложенных расчетных зависимостей для ударных давлений использованы характеристики нижней части шпангоутов по 1/10 от осадки на тихой воде [7, 24,25]. Для последующих моментов погружения контура в воду полная нагрузка на шпангоут от слеминга рассчитывается уже за законом изменения приведенного количества движения жидкости  $q_{sl} \sim d(\mu v)/dt$ , где  $v$  – скорость контура шпангоута при погружении, а  $\mu$  – присоединенная масса воды, определенная по мгновенную осадку контура [3, 8, 24].

Таким образом, проведенные исследования дают основания утверждать, что в инженерных прикладных расчетах слеминга вполне можно использовать накопленные результаты и зависимости, как для ударных давлений, так и для полной нагрузки на контур шпангоута. Обратимся теперь к конкретным зависимостям для гидродинамических нагрузок и упругой реакции судна при слеминге на нерегулярном волнении.

2. Гидродинамические нагрузки при слеминге судов. При разработке практической методики расчета ударной гидродинамической нагрузки от слеминга судна на нерегулярном волнении будем исходить из наиболее простого сценария развития событий, сопровождающего это явление. Сначала оголяется носовая часть корпуса и в результате происходит удар днищем судна о волну (днищевой слеминг). Далее в процессе погружения носовой части корпуса судна в волну при развитых развалах надводной части борта имеет место бортовой слеминг.

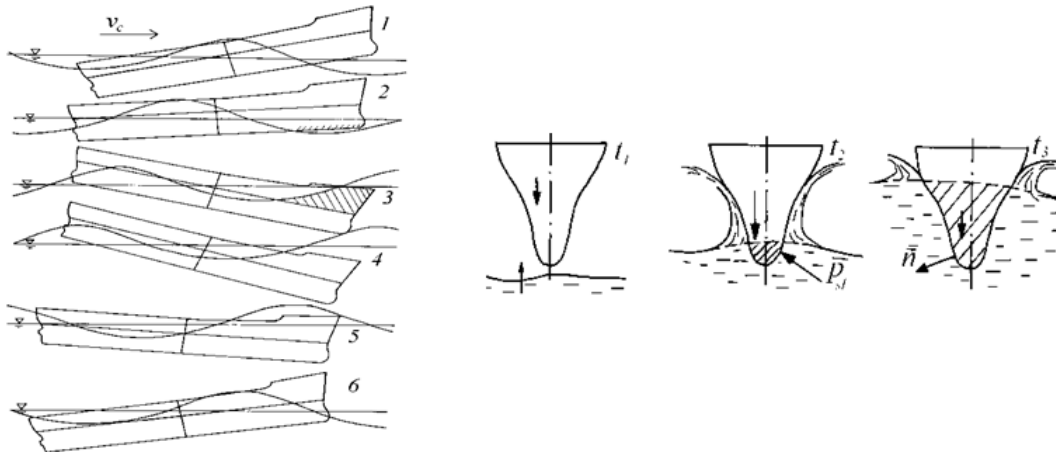


Рис. 6. Последовательные положения судна на волнах, полученные численными расчетами качки

На рис. 6 в качестве примера показаны последовательные положения судна на волнах, полученные численными расчетами качки. Днищевой слеминг – положение судна 2, бортовой слеминг – положение судна 3. При этом необходимо хорошо понимать, что локальная хаотичность волновой поверхности, случайный характер относительного движения судна и волн, эффекты трехмерности и нелинейности, сопровождающие эти движения, упругость обшивки корпуса судна, возможный захват воздуха и пр. могут существенным образом повлиять на данный сценарий протекания событий при ударе, и, соответственно, на интенсивность ударной нагрузки, ее распределение по обшивке и динамику изменения во времени в каждом конкретном случае удара о волну. Однако, как показывают исследования [3, 8, 28], для временного ряда ударов на интервале квазистационарности волнения (30 -40 мин) статистические оценки слеминга будут уже достаточно адекватными и устойчивыми.

В рамках модели тяжелой идеальной и несжимаемой жидкости полное гидродинамическое давление, действующее на обшивку корпуса при погружении носовой части судна во встречную волну определяется известным интегралом Коши-Лагранжа [23, 26]  $p(\vec{x}, t) = -\rho[(\Phi_t - v_c \Phi_x) + \frac{1}{2}(\nabla\Phi \cdot \nabla\Phi) + gz]$ , где  $\rho$  – плотность жидкости;  $\Phi(\vec{x}, t)$  – общий потенциал скоростей возмущенного движения окружающей жидкости;  $v_c$  – скорость поступательного движения судна;  $\nabla = (\partial/\partial x, \partial/\partial y, \partial/\partial z)$  – оператор Гамильтона в

декартовых переменных  $\vec{x} = (x, y, z)$  и здесь и далее использовано индексное обозначение производных. Полное давление может быть записано далее в виде суммы [26]  $p = p_w + p_{sl}$ , где  $p_w$  – волновое давление в невозмущенной судном волне и  $p_{sl}$  – гидродинамическое давление от слеминга судна, которое и представляет основной интерес в данной задаче. Это давление в конечном итоге приводится к виду [26]

$$p_{sl}(\vec{x}, t) = -\rho \left\{ [\Phi_{ot} - (v_c - v_{wx})\Phi_{ox}] + \frac{1}{2} \kappa_{sl} v_r^2 \right\}, \quad (1)$$

где  $\Phi_o(\vec{x}, t)$  – потенциал скоростей движения жидкости, возмущенной ударом и последующим погружением судна в набегающую волну;  $v_r = (v_{sz} - v_{wz})$  – относительная (по отношению к полю скоростей в невозмущенной волне) вертикальна проекция скорости погружения данного сечения корпуса, которая в линейном приближении равна  $v_{sz} = \dot{\zeta}_0 - (x - x_G)\dot{\psi}_0 + v_c\psi_0$ , ( $\zeta_0(t), \psi_0(t)$  – процессы вертикальной и килевой качек судна [1]);  $v_{wx}, v_{wz}$  – продольная и вертикальная проекции скоростей в невозмущенной волне и, наконец,  $\kappa_{sl}$  – коэффициент пропорциональности между давлением и квадратом относительной скорости погружения  $v_r$ .

Укажем, что первый линейный по форме член в квадратных скобках в сумме (1) отражает в основном нестационарные эффекты и эффекты трехмерности движения жидкости в окрестности носовой части судна, тогда как второй квадратичный член – эффекты скоростного напора встречного потока жидкости. Опыт исследований показал [27], что при слеминге днищем, когда удар происходит в первые моменты времени, основной вклад в давление сносит второй скоростной член в (1), тогда как при слеминге развалами борта в последующие моменты времени превалирует уже первый член нестационарной природы. В свою очередь в скоростном члене основным является коэффициент пропорциональности  $\kappa_{sl}$ , который при продольной качке судна на встречном курсе к волнам может быть приведен к виду

$$\begin{aligned} \kappa_{sl} = & \left[ \left( 1 + 2 \frac{v_{wz}}{v_r} \right) \cos^2(n, z) + \left( \frac{v_{ol}}{v_r} \right)^2 \right] + \\ & + 2 \frac{v_{wz}}{v_r} \left[ \frac{v_{ol}}{v_r} \cos(n, y) + \frac{(v_c - v_{wx})}{v_r} \cos(n, x) \cos(n, z) \right], \end{aligned} \quad (2)$$

где  $\vec{n}$  – внешняя нормаль к судовой поверхности и  $v_{ol}$  – касательная к судовому контуру  $\ell$  проекция возмущенного поля скоростей в жидкости ( $v_{ol} = \partial\Phi_o/\partial\ell$ ).

Рассмотрим отдельные величины, входящие в формулу (2). Во-первых, на рис. 7 показаны примеры расчета поля скоростей в свободной симметричной волне (волне Стокса [26]) (а) и в укрупненной ветровой волне (б) [23] и, как видно, в окрестности подошвы волны на переднем склоне, где обычно происходит удар, вертикальная проекция скорости  $v_{wz}$  в волнах сравнительно мала, так что в первом приближении можно принять  $|v_{wz}| \ll |v_{wx}|, |v_r|$ .

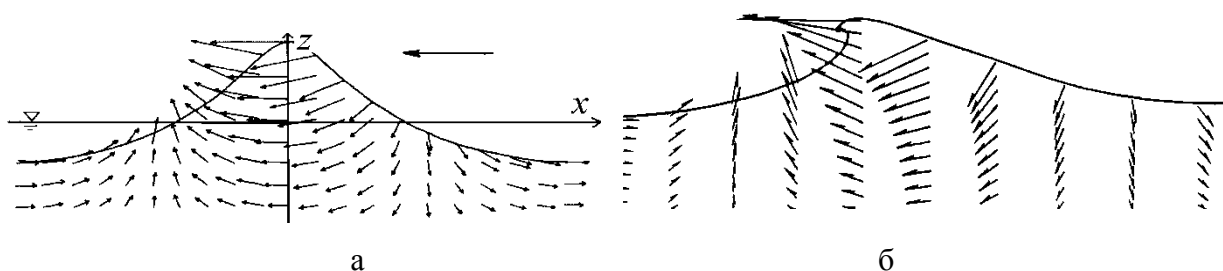


Рис. 7. Примеры расчета поля скоростей в свободной симметричной волне (волне Стокса)

Во-вторых, в носовой части днища судна протяженностью примерно  $(0,2 - 0,25)L$ , которая в основном и воспринимает удар о волну при слеминге,  $|\cos(n, x)|, |\cos(n, y)| \ll 1$ , а  $|\cos(n, z)| \sim 1$ , так что основной вклад в формуле (2) дает квадратичный член  $(v_{ol}/v_r)^2 \gg 1$ . Наконец, в-третьих, на рис. 8 показано поле скоростей в жидкости для клина с углом килеватости в  $45^\circ$ , полученное в работе [21] с помощью МГЭ, а на рис. 9 приведены эпюры нормальной и касательной проекций скоростей, следующие из этого расчета. Как видно, в зоне формирования струи, где возникает максимальное давление, отношение скоростей  $v_{ol}/v_r \approx 1,6$  и тогда формула (2) дает значение  $\kappa_{sl} \approx 3,0$ , что хорошо согласуется с другими данными при  $\gamma_k = 45^\circ$  [21].

При малых углах килеватости  $\gamma_k \leq 3 - 5^\circ$ , характерных для днищевой части судовых контуров в носу, теоретические оценки коэффициента  $\kappa_{sl}$  достигают значений в сотни единиц (рис. 4) [14–16]. Это говорит о том, что при таких углах развиваются очень большие касательные скорости возмущенного движения  $v_{ol}$ , сопровождающиеся образованием мощных струй жидкости по бортам судна (рис. 1).

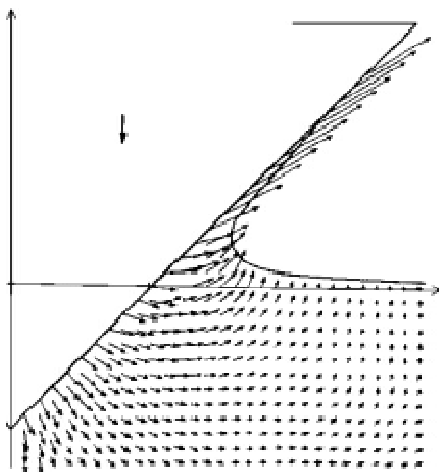


Рис. 8. Поле скоростей в жидкости для клина с углом килеватости в  $45^\circ$

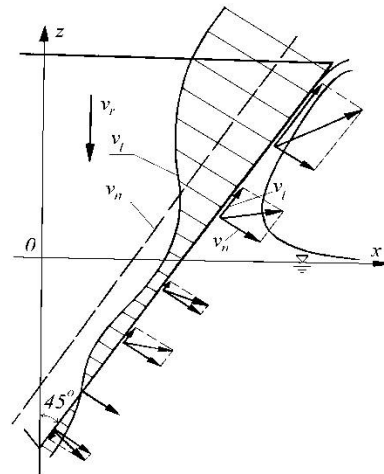


Рис. 9. Эпюры нормальной и касательной проекций скоростей

В балочных моделях расчетов упругой реакции корпуса судна при слеминге (см. ниже) значение имеет скорее не локальное давление на судовую обшивку, а суммарное его значение на весь смоченный судовым контур в данный момент времени, т.е. интенсивность гидродинамической нагрузки

$$q_{sl}(x, t) = - \int_{\ell(x, t)} p_{sl} \cos(n, z) d\ell = q_{sl}^b + q_{sl}^f, \quad (3)$$

где  $\ell(x, t)$  – мгновенная смоченная часть контура с координатой  $x$ ;  $q_{sl}^b, q_{sl}^f$  – составляющие нагрузки от удара днищем (bottom) и от погружения развалами борта (flare) в волну соответственно. Первая составляющая в (3) связана с интегрированием по мгновенному контуру судна скоростного члена, а вторая – нестационарного члена в давлении (1). Разделение полной нагрузки от слеминга на две составляющие  $q_{sl}^b, q_{sl}^f$  полезно не только потому, что они действуют последовательно в различные моменты времени, а в первую очередь из-за того, что эти составляющие ударной нагрузки основаны на различных методиках их приближенного расчета.

В практических задачах первую составляющую нагрузки, связанную с ударом днища о волну, обычно записывают в виде



$$q_{sl}^b(x, t) = \frac{1}{2} \rho \int_{\ell(x, t)} \kappa_{sl} v_r^2 \cos(n, z) d\ell \approx p_{sl}^{\max}(x) v_1(x) v_2(t), \quad (4)$$

где  $p_{sl}^{\max}$  – максимальное значение гидродинамического давления, возникающего при ударе днищем о волну;  $v_1(x)$  – интегральный множитель, связанный с интегрированием ударного давления по части судового контура в пределах расчетной осадки  $d_{0,1} = 0,1d$  ( $d$  – осадка контура по грузовую ватерлинию (ГВЛ));  $v_2(t)$  – временной множитель, определяющий уменьшение ударной нагрузки после ее приложения в момент времени  $t = t_{sl}$ .

Отметим, что время удара  $t_{sl}$  определяется одновременным выполнением трех условий: 1) оголением части днища, 2) малостью угла между килевой линией корпуса и волновым профилем под днищем и 3) превышением скорости соударения  $v_r$  некоторого порогового значения  $v_r \geq v_r^*$ , которое по данным работы [7] равно  $v_r^* = 0,0903\sqrt{gL}$  ( $L$  – длина судна). Из этих условий вытекает существенно случайный характер появления слеминга на нерегулярном волнении, а также трудности в контроле параметров этого явления.

Входящие в формулу (4) множители определяются следующим образом. Максимальное давление  $p_{sl}^{\max}$  равно

$$p_{sl}^{\max}(x) = \frac{1}{2} \rho k_{sl}(x) v_{r0}^2(x), \quad (5)$$

где  $k_{sl}(x)$  – коэффициент пропорциональности между максимальным давлением и квадратом относительной скорости соударения контура с волной  $v_{r0} = (v_{sz} - \dot{\zeta}_w)|_{t=t_{sl}}$ , определенной в момент удара.

Основным в формуле (5) является коэффициент пропорциональности  $k_{sl}$ , для которого на основе экспериментальных и теоретических исследований предложено достаточно много зависимостей. Приведем наиболее известные из таких зависимостей. Формула М.Очи имеет вид [7, 8]

$$k_{sl} = \exp[1,377 + 2,419a_1 - 0873a_3 + 9,624a_5], \quad (6)$$

где  $a_1 = (1 - 2\delta_{0,1}) / (1 + 2\delta_{0,1})$ ,  $a_3 = 2 / [(1 - 2\delta_{0,1}) / \Delta - 2]$ ,  $a_5 \approx 0,015$ ,  $\delta_{0,1} = d_{0,1} / b_{0,1}$  и  $\Delta = -\frac{1}{4} [1 - 2\delta_{0,1} - \sqrt{1 - 20\delta_{0,1}(1 - \beta_{0,1}) + (2\delta_{0,1})^2}]$ ,  $b_{0,1}, \beta_{0,1}$  – полуширина и коэффициент полноты площади шпангоута по расчетную осадку  $d_{0,1}$ .

Ставовый и Чанг в свое время предложили следующую зависимость [8]

$$k_{sl} = 2\kappa_1(\gamma_e) (\cos \gamma_e + \frac{v_e}{v_{r0}} \sin \gamma_e)^2 \cos^{-4} \gamma_e, \quad (7)$$

где  $\gamma_e$  – эффективный угол килеватости контура, определенный с учетом угла волнового склона, а коэффициент  $\kappa_1(\gamma_e)$  равен

$$\kappa_1(\gamma_e) = \begin{cases} 24,22\gamma_e + 72,0, & 0^\circ \leq \gamma_e \leq 2,2^\circ; \\ 314 - 136\gamma_e + 29,3\gamma_e^2 - 3,37\gamma_e^3 + 0,2\gamma_e^4 - 0,0045\gamma_e^5, & 2,2^\circ < \gamma_e \leq 11^\circ; \\ 684 - 194\gamma_e + 22,7\gamma_e^2 - 1,34\gamma_e^3 + 0,039\gamma_e^4, & 11^\circ < \gamma_e \leq 20^\circ; \\ 0,384(1 + 2,47\text{ctg}^2 \gamma_e), & \gamma_e > 20^\circ. \end{cases}$$

Существуют и более простые зависимости, например, формула Г. Бойцова [25]  $k_{sl} = 8,5(\beta_{0,1}/0,75)^{3/2}(1 - 0,05/\delta_{0,1})/\delta_{0,1}$  или формула Каваками [24]  $k_{sl} = \exp[1,26 - 3,375(1 - \delta_{0,1})/(1 + \delta_{0,1})]$  как и многие другие. В каждом конкретном случае

расчеты по формулам типа (6), (7) могут давать результаты, отличающиеся на десятки процентов.

Интегральный множитель  $v_1(x)$  определяется интегрированием давления по мгновенному смоченному контуру шпангоута в момент удара, что довольно трудно выполнить без точного знания характера изменения нагрузки во времени и по контуру, а также реальной геометрии волновой поверхности в зоне удара. Поэтому в практических расчетах исходят из ряда схематических представлений о распределении давления в пределах  $1/10$  от осадки контура на тихой воде  $d_{0,1}$  [7, 24, 25] и одна из зависимостей имеет вид

$$v_1(x) \approx \frac{3}{4} b_{0,1} \left( \beta_{0,1} + \frac{1}{3} \frac{b_f}{b_{0,1}} \right), \quad (8)$$

где  $b_f(x)$  – полуширина плоского участка днища для данного шпангоута.

Временной множитель  $v_2(t)$ , определяющий закон затухания ударной нагрузки во времени, можно аппроксимировать формулой

$$v_2(t) \approx \exp[v_s(t_{sl} - t)/T_1] \quad t > t_{sl}, \quad (9)$$

где  $v_s$  – коэффициент затухания, равный оценочно  $v_s \approx \ln 10 T_1 / \tau_{sl}$ ;  $\tau_{sl}$  – эффективный интервал времени действия ударного давления на обшивку, который, как показали расчеты и эксперименты [14-23], оценивается величиной  $\tau_{sl} \sim (0,4 - 0,7) T_1$ ;  $T_1 = 2\pi/\omega_1$  – период вертикальных колебаний корпуса по первой балочной форме (см. ниже). Отметим, что формулы (8), (9) представляют наиболее простые зависимости для указанных множителей.

Перейдем теперь ко второй составляющей нагрузки в (3), связанной со слемингом судна развалами борта. Для ее практического расчета используется концепция мгновенных значений присоединенных масс жидкости, определенных по волновую осадку судовых контуров  $d_w(x, t)$  в каждый момент времени [3, 8, 26]. Тогда расчетная зависимость имеет вид

$$\begin{aligned} q_{sl}^f(x, t) &= -\rho \int_{\ell(x, t)} [\Phi_{ot} - (v_c - v_{wx}) \Phi_{ox}] \cos(n, z) d\ell \approx \\ &\approx - \left( \frac{\partial}{\partial t} - (v_c - \langle v_{wx} \rangle) \frac{\partial}{\partial x} \right) [\mu_w(x, t) v_{r0}(x, t)], \end{aligned} \quad (10)$$

где  $\mu_w(x, t) = \mu_w(x, d_w(x, t))$  – присоединенная масса при вертикальных движениях судового контура, определенная по мгновенную волновую осадку  $d_w(x, t)$ ;  $\langle v_{wx} \rangle$  – усредненное на мгновенном смоченном судовом контуре значение продольной скорости в волне.

Отметим также, что при расчете нагрузки от бортового слеминга к (10) следует добавлять также и волновую часть нагрузки [26, 28], нелинейная высокочастотная составляющая которой вносит определенный вклад в возбуждение упругой реакции корпуса судна, тогда как линейная составляющая учитывается в расчетах качки судна:

$$q_w(x, t) = - \int_{\ell(x, t)} p_w \cos(n, z) d\ell.$$

Как видно из приведенных выше формул, расчет слеминга невозможен без предварительного расчета кинематики (вертикальных перемещений и скоростей) при продольной качке судна на нерегулярных волнах. В линейном приближении, которое в общем является достаточным при проведении практических расчетов, эти расчеты могут быть выполнены в рамках следующей технологии. Частотный спектр нерегулярного волнения, который характеризует состав и интенсивность заданного режима волнения на интервале квазистационарности, аппроксимируется линейчатым дискретным спектром с  $N \gg 1$  гармоническими составляющими. Далее выполняется численный расчет продольной

качки судна на каждой гармонической составляющей спектра с некоторым шагом в дискретные моменты времени методами линейной гидродинамики судна [26]. Полученные таким образом временные реализации процессов качки суммируются по всему частотному диапазону заданного спектра, так что в результате получаются временные реализации нерегулярных процессов качки на интервале квазистационарности режима волнения, которые и входят в расчетные зависимости для ударных нагрузок при слеминге на нерегулярном волнении.

Приведем пример расчета ударной нагрузки для двух теоретических шпангоутов в носу судна (эсминца) за 30 мин, заимствованный из работы [8], рис. 10. В вероятностном плане этот ряд событий моделируется потоком Пуассона [7], а статистические характеристики слеминга – вероятностные распределения для интенсивности ударов, времени между ударами, числа ударов за данное время и пр. можно получить прямой обработкой численных реализаций на квазистационарных режимах волнения и реакции судна.

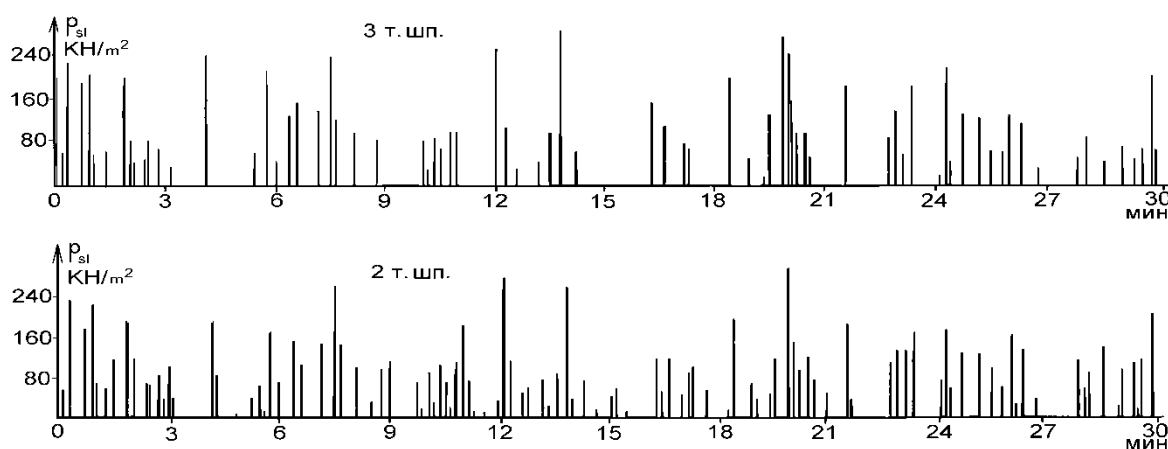


Рис. 10. пример расчета ударной нагрузки для двух теоретических шпангоутов в носу судна (эсминца) за 30 мин

3. Упругая реакция корпуса судна при слеминге. В расчетах общей вибрации судов используют в основном балочные модели, в частности, простейшую модель “балки Эйлера”, более общую модель “балки Тимошенко” (учитывающую деформации сдвига и инерцию вращения масс в поперечных сечениях) [30], а также различные модели “балки Власова” (учитывающие оболочечные эффекты корпуса и деформации поперечных сечений более высоких порядков для судов с пониженной жесткостью корпуса – контейнеровозов, накатных судов типа Ро-Ро) [31]. Очевидно, что все более тонкие эффекты динамической реакции корпуса судна должны проявляться при возбуждении достаточно высоких форм главных свободных колебаний корпуса (ГСК). Натурные экспериментальные данные показывают [6,17], что в реальных условиях волнения от слеминга возбуждаются первых три, максимум четыре формы ГСК, причем возбуждаются в основном симметричные двух- и четырех узловые формы колебаний корпуса (т.е. первая и третья формы ГСК), а до 80% энергии приходится на первую двухузловую форму ГСК. Поэтому в данной задаче при разработке практической методики можно ограничиться простейшей балочной моделью, для которой уравнение вертикальных колебаний имеет вид [30]

$$\frac{\partial^2}{\partial x^2} \left[ EJ(1 + \alpha_d^{in} \frac{\partial}{\partial t}) \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} \right] + m \frac{\partial^2 w}{\partial t^2} + \alpha_d^{ex} \frac{\partial w}{\partial t} = q_{sl} + q_{wi}, \quad (11)$$

где  $EJ(x)$ ,  $m(x)$  – изгибная жесткость и погонная масса корпуса судна;  $w(x,t)$  – упругие вертикальные перемещения нейтральной оси корпуса;  $\alpha_d^{in}, \alpha_d^{ex}$  – коэффициенты внутреннего конструкционного демпфирования корпуса и внешнего демпфирования среды (грузов,

забортной воды и др.);  $q_{sl}(x,t)$  – ударная нагрузка от слеминга;  $q_{wi}(x,t)$  – гидродинамическая нагрузка, связанная с вибрацией судна в жидкости [29].

В гидродинамической нагрузке  $q_{wi}$ , из-за малости перемещений и скоростей возмущенного волнового движения жидкости от вибрации корпуса судна, учитывается только инерционная составляющая [29 – 31], так что далее  $q_{wi} = -\mu_n \ddot{w}$ , где  $\mu_n(x)$  – вибрационная присоединенная масса судового контура в сечении  $x$  [29]. Отметим, что по величине присоединенные массы жидкости соизмеримы с инерционной массой судна.

Для интегрирования уравнения (11) в практике расчетов в основном применяют два метода: а) метод главных координат (МГК) [3, 8] с использованием форм ГСК и б) метод конечных элементов (МКЭ) с разбиением корпуса на балочные конечные элементы, см., например, [32]. МГК является простым в расчетах и приводит к независимым уравнениям во времени для главных координат, однако требует предварительных расчетов форм ГСК и дает несколько завышенные числовые оценки для амплитуд колебаний. МКЭ является более точным, однако при его использовании приходится интегрировать по времени связанную систему большого количества дифференциальных уравнений для узловых перемещений, что возможно только численно с применением ЭВМ. Поэтому, в рамках практической методики расчета слеминга судна, далее рассмотрим зависимости МГК, согласно которому упругие перемещения корпуса судна представляются в виде

$$w(x,t) \approx \sum_{n=1}^N f_n(x) u_n(t), \quad (12)$$

где  $f_n(x)$  – известные формы ГСК и  $u_n(t)$  – главные координаты, подлежащие определению;  $N \leq 3 \div 4$ . Формы колебаний  $f_n(x)$  (как и частоты колебаний  $\omega_n$ ) определяются как результат решения задачи на собственные значения для свободных колебаний непризматической безопорной балки – корпуса судна тем или иным методом [30].

Подстановка решения (12) в уравнение (11) и применение процедуры Бубнова-Галеркина (в предположении ортогональности форм ГСК по массам и жесткости) приводит окончательно к уравнениям для главных координат

$$\ddot{u}_n + 2\nu_n \dot{u}_n + \omega_n^2 u_n = q_n(t), \quad n = 1; 2; \dots; N, \quad (13)$$

где  $2\nu_n = \Lambda_n / M_n$  и  $\omega_n^2 = K_n / M_n$  – приведенные коэффициенты демпфирования и частоты  $n$ -го ГСК;  $q_n(t)$  – приведенные возмущающие силы

$$q_n(t) = \frac{1}{M_n} \int_{(L)} q_{sl}(x,t) f_n(x) dx, \quad (14)$$

где интегрирование ведется по длине корпуса судна  $L$ .

В (13) использованы обобщенные коэффициенты масс  $M_n$ , демпфирования  $\Lambda_n$  и жесткости  $K_n$ , равные

$$\begin{aligned} M_n &= \int_{(L)} (m(x) + \mu_n(x)) f_n^2(x) dx, & K_n &= \int_{(L)} EJ(x) (f_n''(x))^2 dx, \\ \Lambda_n &= \int_{(L)} [\alpha_d^{ex} f_n^2(x) + \alpha_d^{in} (f_n''(x))^2 EJ(x)] dx. \end{aligned} \quad (15)$$

Общее решение уравнений (13) определяется известным интегралом Дюамеля [30] и имеет вид

$$u_n(t) = \frac{1}{\omega_n^*} \int_{t_{sl}}^{t_m} q_n(\tau) e^{-\nu_n(t-\tau)} \sin \omega_n^*(t-\tau) d\tau,$$

где  $\omega_n^* = \sqrt{\omega_n^2 - \nu_n^2}$ ;  $t_m = t$  при  $t < (t_{sl} + \tau_{sl})$  и  $t_m = t_{sl} + \tau_{sl}$  при  $t > (t_{sl} + \tau_{sl})$ .

Соответственно ускорение для  $n$ -ой главной координаты  $\ddot{u}_n(t)$  равно

$$\ddot{u}_n(t) = q_n(t) - \omega_n \int_{t_{sl}}^{t_m} q_n(\tau) e^{-\nu_n(t-\tau)} \sin[\omega_n^*(t-\tau) - \alpha_{nw}] d\tau, \quad (16)$$

где  $\alpha_{nw} = 2\tilde{\nu}_n(1 + 2\tilde{\nu}_n^2) \approx 2\tilde{\nu}_n \ll 1$ , – фазовый сдвиг,  $\tilde{\nu}_n \sim (2-5)10^{-3}$  [30].

Вертикальная и продольная проекции ускорений от слеминга в произвольной точке судового корпуса с координатами  $x, z$  определяются формулой

$$a_z(x, t) = \sum_{n=1}^N \ddot{u}_n(t) f_n(x), \quad a_x(x, t) = (z - z_{н.о.}) \sum_{n=1}^N \ddot{u}_n(t) \frac{\partial f_n(x)}{\partial x},$$

где  $z_{н.о.}(x)$  – положение нейтральной оси поперечных сечений корпуса.

Таким образом, задача расчета ускорений в основном сводится к оценке интегралов Дюамеля по времени (16) и интегралов по длине судна типа (15), которые в общем случае следует вычислять численно при дискретизации по длине с шагом  $\Delta L = L/20$ , а по времени –  $\Delta t = 2\pi/M\omega_1$ ,  $M \sim 30-50$

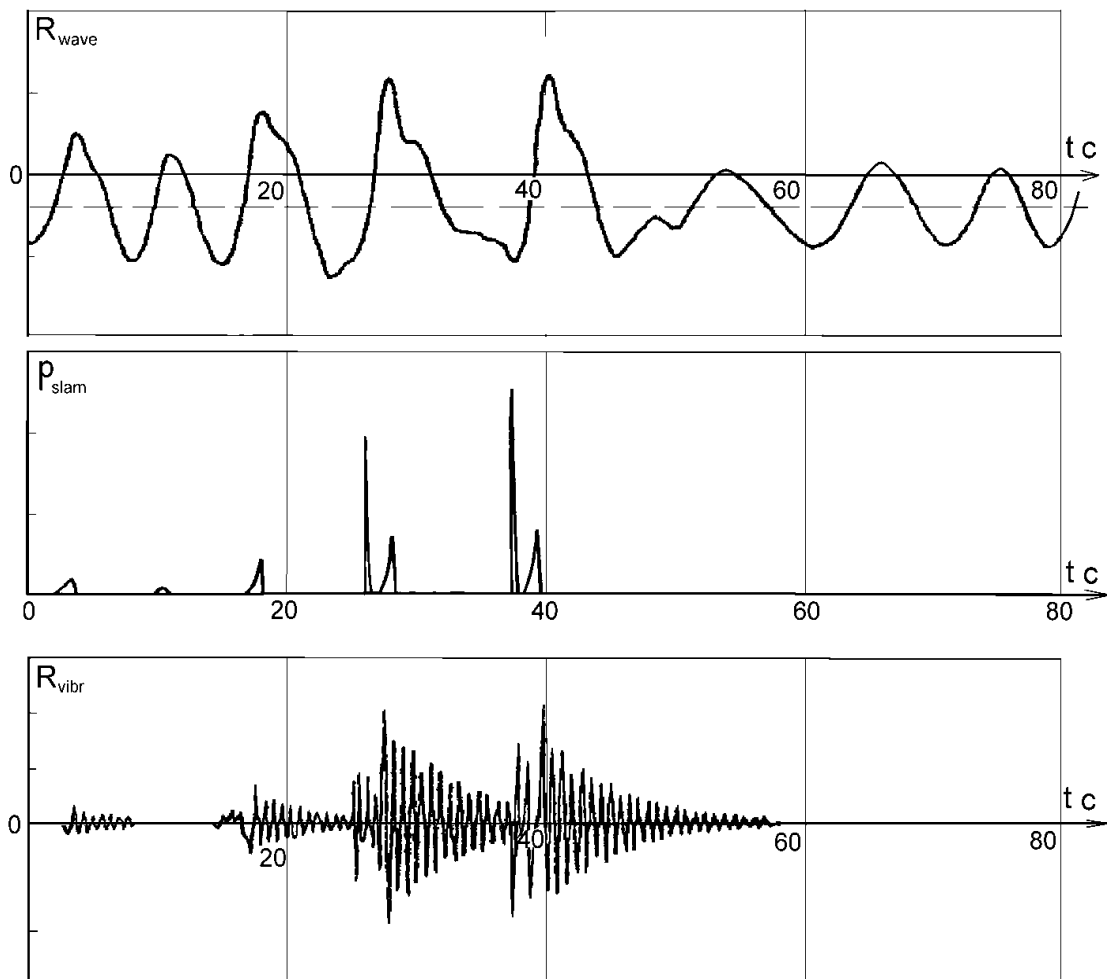


Рис. 11. Результаты численного расчета волновой реакции судна-контейнеровоза

На рис. 11 последовательно приведены результаты численного расчета волновой реакции судна-контейнеровоза, ударной нагрузки при слеминге днищем (первые пики) и бортом (вторые пики), а также упругой реакции судна на действие данной нагрузки за 80 секунд, полученные в работе [28]. Как видно, слеминг судна происходит на наиболее крутых волнах в группах, а интенсивность ударов днищем может быть больше, чем при ударах бортом, однако в последнем случае большей может оказаться энергоемкость удара и,

соответственно, интенсивность вибрации судна. Следующие удары произойдут примерно через 1,5 – 2,5 мин на другой интенсивной группе волн.

### **Анализ полученных результатов исследования**

1. В настоящее время существует приближенная методология расчета слеминга судов, обеспечивающая приемлемую практическую точность оценок ударных гидродинамических нагрузок, упругой реакции корпуса судна от их действия и развивающихся при этом ускорений в точках корпуса. Эта методология базируется на значительном объеме модельных экспериментов в бассейнах, натурных испытаний в море, а также обширных теоретических расчетах аналитическими и численными методами, в основном методом граничных элементов. Дальнейшее продвижение в проблеме слеминга связано в первую очередь с уточнениями методов расчета ударных гидродинамических нагрузок от слеминга, что обусловлено успехами в решении сильно нелинейных и нестационарных краевых задач теории потенциала для контуров, пересекающих волновую поверхность.
2. Ударные гидродинамические нагрузки от днищевого слеминга в основном более интенсивные и более краткосрочные, чем следующие за ними нагрузки от бортового слеминга – удара в развал надводной части корпуса судна в носу. Однако последние, как правило, оказываются более энергоемкими и поэтому способны вызывать более интенсивные упругие колебания корпуса в вертикальной плоскости после удара. При этом практически возбуждаются первые четыре балочные формы колебаний корпуса, первая из которых является наиболее энергоемкой. Поэтому при решении практических задач метод главных координат является вполне приемлемым для оценки упругой реакции корпуса и возникающих при этом вибрационных ускорений
3. Численные расчеты слеминга судов во времени на интервалах квазистационарности нерегулярного волнения (порядка 30 – 40 мин) позволяют получить семейства временных реализаций, например, ускорений в точках судового корпуса при варьировании района плавания, параметров интенсивности режима волнения, условий загрузки судна и пр. Статистическая обработка этих реализаций дает возможность получить гистограммы для интенсивности ударов и их частоты, уровней вибрационных ускорений, числа циклов и пр.

### **ЛИТЕРАТУРА**

1. Ушкалов В.Ф., Сердюченко А.Н., Шерстюк А.К. Ускорения, возникающие при морской транспортировке ракет-носителей в условиях волнения и качки // *Техническая механика*. – 2006. – Вып. 2. – С. 20-31.
2. Ушкалов В.Ф., Сердюченко А.Н. Характеристика ветро-волновых режимов на маршруте транспортировки ракет-носителей из порта Украины к Экватору // *Техническая механика*. – 2007. – Вып. 1. – С. 20-36.
3. Knuuttila E., Matusiak J., Rantanen A. Wave-Induced Slamming Loads and Ship Response – Calculations and Measurements. // Helsinki, VTT Report. – 1985. – P. 71–121.
4. Washio Y., Takanabe H., Inone K. Study of Wave Loads by Full Scale Measurements of Large Ligth Alloy High-Speed Craft // *Trans. W.- Jap. Soc. Naval Arch.* – 1978. – Vol. 58. – P. 69-83.
5. Takemoto H., Hashizume Y. Full-scale measurement of wave impact loads and hull responses of ship in waves // *J. Soc. Naval Arch. Japan.* – 1985. – Vol. 158. – P. 256–269.
6. Lacey P., Edwards R. ARCO Tanker Slamming Study // *Marine Technology*. – 1993. – Vol. 30, № 3. – P. 135–147.
7. Ochi M.K., Motter L. E. Prediction of Slamming Characteristics and Hull Responses for Ship Design // *SNAME*. – 1973. – № 4. – 23 p.

8. Belik O., Price W.G. Comparison of slamming theories in the time simulation of ship responses in irregular waves // *Int. Shipb. Progress.* – 1982. – Vol. 3, № 4. – P. 173–187.
9. Yamamoto Y., Fujino M., Ohtsubo H., Fukasawa T. Disastrous Damage of a Bulk Carrier due to Slamming // *J. Soc. Naval Arch. Japan.* – 1983. – V. 154. – P. 516–524.
10. Yamamoto Y., Iida K., Fukasawa T., Murakami T. Structural damage analysis of a fast ship due to bow flare slamming // *Int. Shipb. Progr.* – 1985. – Vol. 34, № 369.
11. Proceedings of the International Ship and Offshore Structures Congress ISSC'03 / Committee II.1, Wave Loads. – USA, 2003. – P. 59–16.
12. Логвинович Г.В. Гидродинамика течений со свободными границами. – К.: Наукова думка, 1969. – 250 с.
13. Сагомоян А.Я. Проникание. – М.: Изд-во МГУ, 1974. – 298 с.
14. Ohtsubo H., Kohno Y. On the Maximum Pressures in the Water Impact of the Wedge Model // *J. Soc. Naval Arch. Japan* – 1985. – Vol.157. – P. 403–408.
15. Yamamoto Y., Ohtsubo H., Kohno Y. Water Impact of Wedge Model // *J. Soc. Naval Arch. Japan.* – 1984. – Vol. 155. – P. 236–245.
16. Takemoto H. Water Impact Test of a Wedge with Rectangular Plates and its Analysis // *J. Soc. Naval Arch. Japan.* – 1984. – Vol.156. – P. 306–313.
17. Takemoto H., Watanabe I., Hashizume Y., Naoi T. On the Full Scale Measurement of Motions and Impact Loads of a High Speed Patrol Boat in Waves // *Trans. W.- Jap. Soc. Naval Arch.* – 1981. – № 61. – P. 167–179.
18. Watanabe I. Analytical Expression of the Hydrodynamic Impact Pressure by Matched Asymptotic Expansion Technique // *Trans. W.- Jap. Soc. Naval Arch.* – 1986. – № 71. – P. 77–85.
19. Howison S.D., Ockendon J.R., Wilson S.K. Incompressible water-entry problems at small deadrise angles // *J.Fluid Mech.* – 1991. – Vol. 222. – P. 215–230.
20. Korobkin A.A., Pakhnachev V.V. Initial Stage of Water Impact // *Ann. Rev. Fluid Mech.* – 1988. – Vol. 20. – P. 159–185.
21. Tanizawa K. Self-Similar Solution of Wedge Entry Problem by B.E.M. // *J. Kansai Soc. Naval Arch. Japan.* – 1985. – № 196. – 147–154.
22. Geers T.L. A Boundary-Element Method for Slamming Analysis // *J. Ship Research.* – 1982. – Vol. 26, № 2. – P. 117–124.
23. Takagi K., Naito S., Nakamura S. Computation of Nonlinear Hydrodynamic Forces on Two-Dimensional Body by Boundary Element Method // *J. Kansai Soc. Naval Arch. Japan.* – 1985. – № 197. – 31–38.
24. Kawakami M., Tanaka K., Michimoto J., Nitta S., Kanazawa M. On the Whipping Vibration due to Slamming of General Cargo Ship // *Trans. W.- Jap. Soc. Naval Arch.* – 1980. – № 60. – P. 45–157.
25. Бойцов Г.В., Кудрин М.А. Методика расчёта гидродинамических давлений от слеминга // *Тр. Межд. Конф. памяти акад. Ю. Шиманского.* – С.Пб., 1999. – С. 33–36.
26. Сердюченко А.Н. Динамика морских волн и судна в шторме с учетом нелинейных эффектов // *Гидромеханика: Межвед. сборн. научн. тр.* – К., 1998. – Т. 72. – С. 112–134.
27. Faltinsen O.M. On Seakeeping of Conventional and High-Speed Vessels // *J. Ship Research.* – 1993. – Vol. 37, № 2. – P. 87–101.

28. Dynamic Loading for Structural Analysis of Fine Form Container Ship Based on Non-Linear Large Amplitude Motions and Loads Method / Shiu Y-S., Chung J.S., Lin W.M., Zhang S., Engle A. // Trans. SNAME. – 1997. – Vol. 105. – P. 127–154.
29. Короткин А.И. Присоединенные массы судна: Справочник. – Л.: Судостроение, 1986. – 312 с.
30. Постнов В.А., Калинин В.С., Ростовцев Д.М. Вибрация корабля. – Л.: Судостроение, 1983. – 247 с.
31. Бишоп Р., Прайс У. Гидроупругость судов: Пер. с англ.– Л.: Судостроение, 1983. – 420 с.
32. Soares C.G. Transient response of ship hulls to wave impact // Int. Shipb. Progress. – 1989. – Vol. 36, № 406. – P. 137–156.