

УДК 681.518.3

## ИССЛЕДОВАНИЕ ДИНАМИЧЕСКИХ ВОЗДЕЙСТВИЙ НА ОБЪЕКТЫ МОРСКОЙ ТРАНСПОРТИРОВКИ ПРИ БОРТОВОЙ КАЧКЕ

**С.В. Широков**

ФГУП «ГНПРКЦ «ЦСКБ-Прогресс»  
443009, г. Самара, ул. Земеца, д. 18  
E-mail: csdb@samtel.ru

*Рассматривается способ определения перегрузок в местах опирания перевозимого морским транспортом изделия с помощью формирования структурной схемы динамических звеньев определения их передаточных функций. Исследуются зависимости величин перегрузок от различных факторов.*

**Ключевые слова:** *схема транспортирования, динамическое звено, передаточная функция, морское волнение, амплитудно-частотная характеристика, перегрузка.*

При транспортировании изделий ракетно-космической техники морским транспортом одним из внешних воздействий, определяющих состояние изделия после транспортировки и готовность его к дальнейшей эксплуатации, являются перенесенные им перегрузки в процессе транспортировки. В случае превышения заданных значений перегрузок в процессе транспортировки возникнет необходимость проведения дополнительных мероприятий для дальнейшей его эксплуатации, вплоть до полной замены дорогостоящего изделия. В связи с этим возникает задача определения возможных перегрузок и в случае прогнозирования превышения ими допустимых значений осуществлять превентивные меры по их недопущению.

Для решения задачи определения возможных перегрузок конкретного изделия возникает необходимость создания индивидуальных упрощенных методов расчета, позволяющих оперативно оценить выбранные конструктивные особенности объекта транспортирования и принять при необходимости мероприятия к их улучшению.

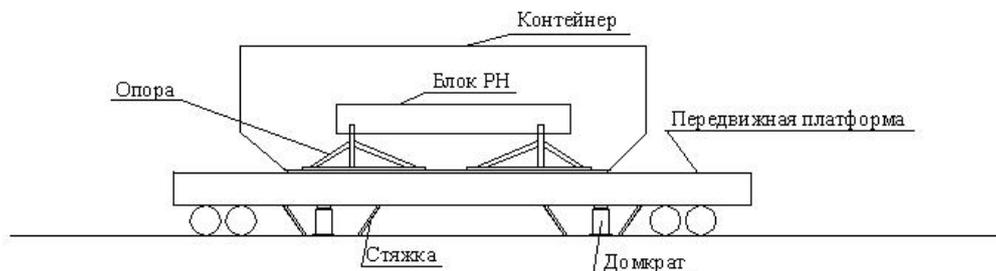
В данной статье описывается способ определения перегрузок, воздействующих на блоки ракеты-носителя типа «Союз», транспортируемые на судне типа «Тукан» из порта г. Санкт-Петербурга в порт г. Кайена во Французской Гвиане.

Транспортирование этих изделий осуществляется в специальных контейнерах, установленных на передвижные платформы на пневматическом ходу, которые, в свою очередь, при выставлении их в определенное место на борту судна поддомкрачиваются и закрепляются растяжками (рис. 1).

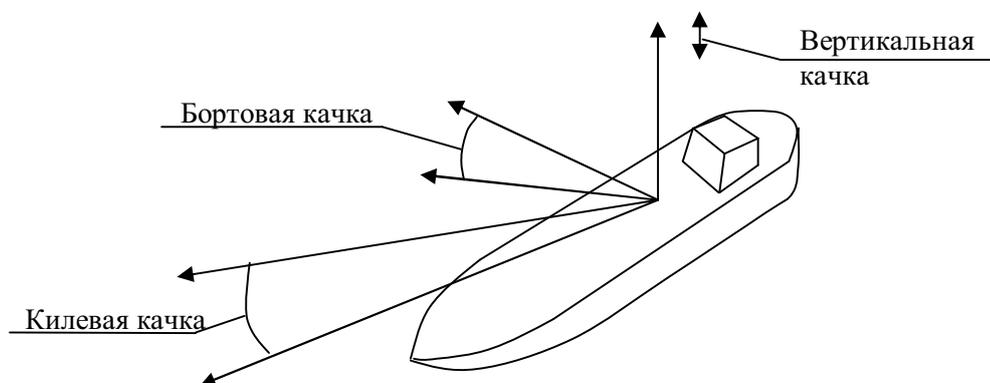
Установка и закрепление изделия в транспортировочных контейнерах производится на двух (неподвижной и подвижной) опорах, представляющих ферменные конструкции, устанавливаемые на основание контейнера. Неподвижная опора воспринимает нагрузки по осям X, Y, Z. Подвижная опора воспринимает нагрузки по осям Y, Z и обеспечивает температурные перемещения изделия по оси X. Удлинение (укорочение) изделия при перепаде температур во время транспортировки составляет до 15 мм.

При морском волнении судно испытывает следующие виды колебаний: бортовую, килевую и вертикальную качку, а также поперечно-горизонтальные, бортовые колебания и рыскания [1]. Для решения поставленной задачи будем рассматривать

нижеприведенные движения судна (рис. 2), а остальными пренебрежем из-за их малого влияния на объект транспортирования.



Р и с. 1. Транспортирование изделий



Р и с. 2. Схема движений судна

При рассмотрении судна и объекта транспортирования как динамических звеньев можно разработать математические модели для каждого вида качки [2].

Расчетные схемы для бортовой качки и структурная схема моделей, включающая передаточные функции выделенных динамических звеньев, показаны на рис. 3.

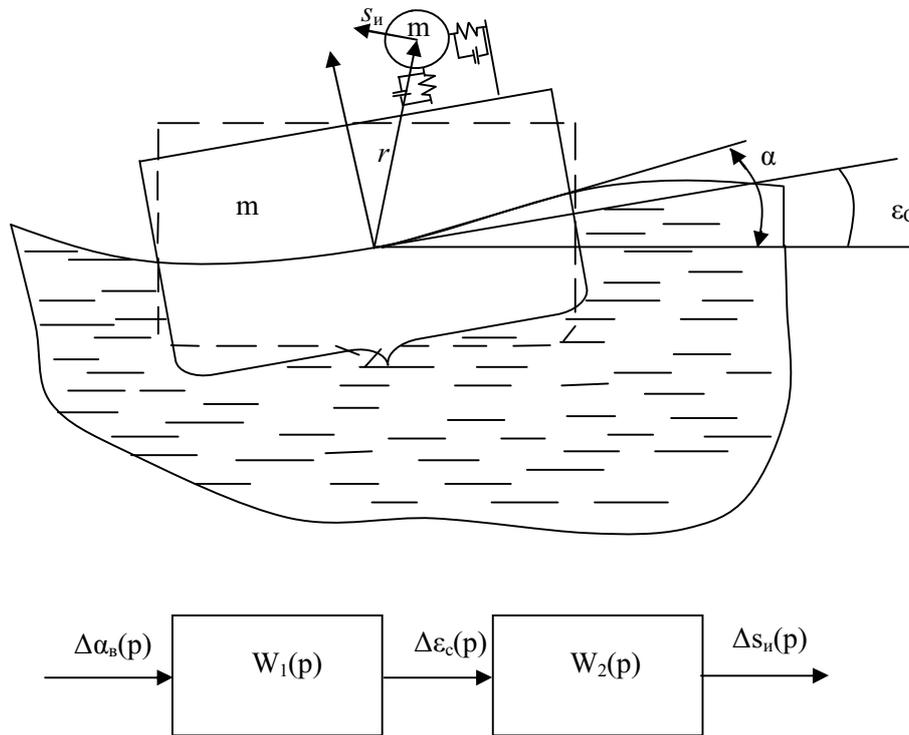
Передаточные функции  $W_1(p)$  и  $W_2(p)$  устанавливают взаимосвязь между исследуемыми переменными:

$$W_1(p) = \frac{\Delta \varepsilon_c(p)}{\Delta \alpha_s(p)}; \quad W_2(p) = \frac{\Delta s_u(p)}{\Delta \varepsilon_c(p)}.$$

Для определения  $W_1(p)$  воспользуемся уравнением бортовой качки [3]. В соответствии с принципом Даламбера для составления дифференциального уравнения бортовой качки сумма внешних моментов, включая момент инерции судна, приравнивается нулю. Учитывая выражения для инерционного, восстанавливающего и демпфирующего момента и, сделав ряд преобразований, уравнение бортовой качки представим в следующем виде:

$$\frac{d^2 \Delta \varepsilon_c}{dt^2} + 2\mu_\varepsilon \omega_\varepsilon \frac{d \Delta \varepsilon_c}{dt} + \omega_\varepsilon^2 \Delta \varepsilon_c = b_\varepsilon \Delta \alpha_s, \quad (1)$$

где  $\mu_\varepsilon$  – относительный коэффициент затухания;  $\omega_\varepsilon$  – частота свободных незатухающих колебаний судна;  $b_\varepsilon$  – коэффициент пропорциональности.



Р и с. 3. Расчетная и структурная схемы моделей:  
 $\alpha_b$  – угол наклона волны;  $\epsilon_c$  – угол наклона судна;  $s_{и}$  – перемещение изделия;  
 $r$  – расстояние между осью вращения судна и центром тяжести изделия;  $m_c$  – масса судна;  
 $m_{и}$  – масса изделия

Величины  $\mu_\epsilon$ ,  $\omega_\epsilon$ ,  $b_\epsilon$  определяются исходя из характеристик судна.

Преобразовав уравнение (1) по Лапласу, можно записать

$$W_1(p) = \frac{\Delta\epsilon(p)}{\Delta\alpha(p)} = \frac{k_1}{(T_1^2 p^2 + 2\xi_1 T_1 p + 1)},$$

где  $p$  – оператор Лапласа,  $k_1 = \frac{b_\epsilon}{\omega_\epsilon^2}$ ,  $T_1 = \frac{1}{\omega_\epsilon}$ ,  $\xi_1 = \mu_\epsilon$ .

Для определения  $W_2(p)$  в структуре объекта, отражающего динамику связи между перемещением  $s_{и}$  изделия и кинематическим воздействием  $\epsilon_c$ , уравнение движения может быть записано [4] в виде

$$m_u \frac{d^2 \Delta s_u}{dt^2} = k_2 (\Delta \epsilon_c r - s_u) - s_u \beta \frac{ds_u}{dt}.$$

После преобразований и перехода к изображениям получим передаточную функцию второго звена

$$W_2(p) = \frac{\Delta s_u(p)}{\Delta \epsilon_c(p)} = \frac{r}{T_2^2 p^2 + 2\xi_2 T_2 p + 1},$$

где  $T_2 = \sqrt{\frac{m_u}{k_2}}$ ;  $\xi_2 = \frac{\beta}{k_2 2T_2}$ .

Таким образом, динамическая модель рассматриваемого объекта, связывающая перемещение изделия  $s_u$  с возмущением  $\varepsilon_B$ , может быть представлена в виде передаточной функции

$$W'_o(p) = \frac{\Delta s_u(p)}{\Delta \varepsilon_B(p)} = W_1(p)W_2(p) = \frac{k_1 r}{(T_1^2 p^2 + 2\xi_1 T_1 p + 1)(T^2 p^2 + 2\xi T p + 1)}.$$

Учитывая, что силовое воздействие на изделие определяется величиной ускоренной  $\ddot{s}_u = \frac{d^2 s_u}{dt^2}$ , получим дополнительно передаточную функцию объекта, приняв за выходную величину ускорение  $\ddot{s}_u$ .

Используя преобразование Лапласа, можно записать

$$\ddot{s}_u(p) = p^2 s_u(p).$$

Тогда искомая передаточная функция будет

$$W_o(p) = \frac{\Delta \ddot{s}_u(p)}{\Delta \varepsilon_B(p)} = p^2 W'_o(p) = \frac{b_\varepsilon r p^2}{(p^2 + 2\mu_\varepsilon \omega_\varepsilon p + \omega_\varepsilon^2)(T^2 p^2 + 2\xi T p + 1)}. \quad (2)$$

С учетом характеристик объекта примем  $T_2 = 0,22$ ,  $\xi_2 = 0,9$ .

Для судна типа «Тукан» с длиной наибольшей 115,5 м, шириной 20,38 м, осадкой 5 м, водоизмещением брутто 9125 т в соответствии с [3] величины коэффициентов будут следующие:

$$\mu_\varepsilon = 0,2 = 0,2; \quad \omega_\varepsilon = 0,77 = 0,77; \quad b_\varepsilon = 0,2 = 0,2.$$

Определим характеристики возмущающего воздействия, за которое принимается морское волнение.

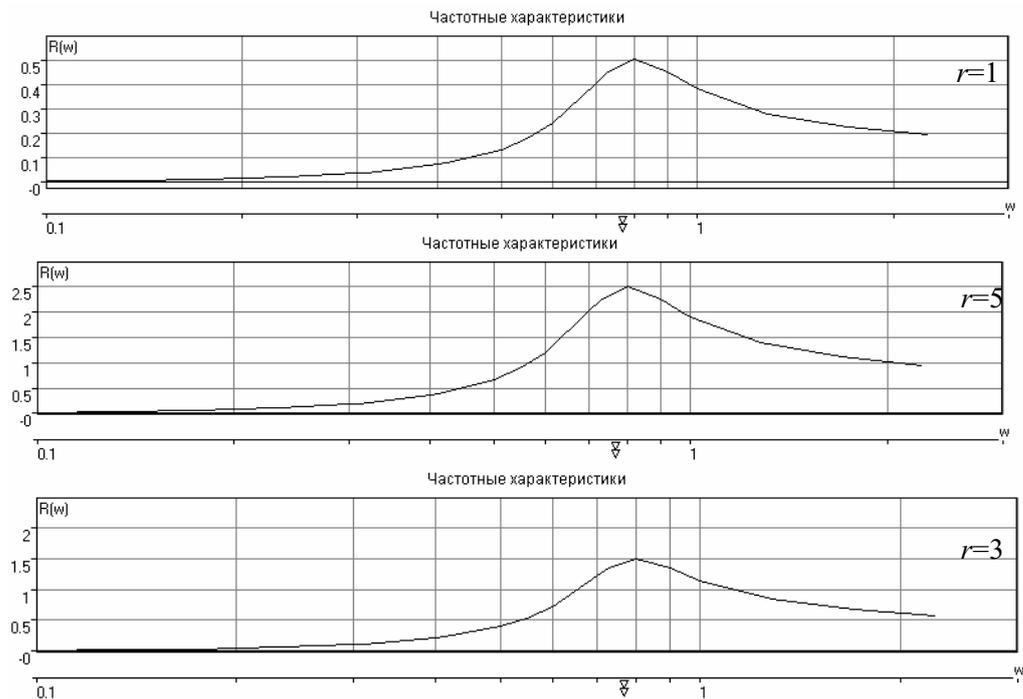
На основе полученной выше передаточной функции (2) с помощью типовых программ получены нижеприведенные (рис. 4) амплитудно-частотные характеристики объекта для различных значений  $r$ .

Используя приведенные в [1] и [5] формулы и статистические данные, можно определить угловую частоту волнения. Для волнения силой 3 балла ( $h_B = 1,25$ ) она составит  $\omega_{1,25} = 1,7$  рад/с; для волнения силой 6 баллов ( $h_B = 3,5 \div 6$ ) она составит  $\omega_{3,5 \div 6} = 1,017 \div 0,777$  рад/с.

Из полученных на рис. 4 характеристик видно, что наибольшее значение выходной переменной достигается при частоте около  $\omega = 0,8$ , что соответствует высоте волны  $h_B = 6$  м.

Исходя из того, что для морских ветровых волн амплитуда угла волнового склона  $\alpha = 9^\circ = 0,15$  рад [3], по полученным характеристикам можно определить, что максимальная величина ускорения в точке опирания изделия при  $r = 5$  м и  $h_B = 6$  м составит  $\ddot{s}_u = 0,38$  м/с<sup>2</sup>.

Предлагаемая методика позволяет оценить перегрузки, воздействующие на изделие при морской транспортировке, а также изучить влияние изменения параметров объекта на перегрузки, возникающие в точках закрепления объекта. Для условий, приведенных выше в качестве примера, они не превышают заданных для блоков РН типа «Союз» при транспортировании. В статье проанализирован только режим установившихся колебаний для бортовой качки, однако полученные модели позволяют рассмотреть также переходные процессы и получить оценки перегрузок при случайном характере воздействий. Кроме того, аналогичным способом можно определить величины ускорений в точках опирания изделия для вертикальной и килевой качек корабля.



Р и с. 4. Амплитудно-частотные характеристики объекта для различных значений  $r$

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Басин А.М.* Качка судов. – М.: Машиностроение, 1969. – 278 с.
2. *Гальперин М.В.* Автоматическое управление. – М.: ФОРУМ: ИНФРА-М, 2004. – 224 с.
3. *Вагущенко Л.Л.* Бортовые автоматизированные системы контроля мореходности. – Одесса: Фенікс, 2005. – 274 с.
4. *Пановко Я.Г.* Устойчивость и колебания упругих систем. – М.: Наука, 1987. – 352 с.
5. *Семенов-Тянь-Шанский В.В.* Качка корабля. – Л.: Судостроение, 1969. – 324 с.

Статья поступила в редакцию 24 февраля 2011 г.

UDK 681.518.3

## RESEARCHING DYNAMIC INFLUENCE ON THE OBJECTS SEA TRANSPORTATION DURING PITCHING

**S.V. Shirokov**

«Progress» Design Bureau, Samara, Russia  
18, Zemetsa st., Samara, 443009

*The paper refers to searching overloads in cargo support equipment of maritime ships by building the structure schemes of dynamic elements and defining their transfer function. Various factors influence on overload values is investigated.*

**Keywords:** transporting scheme, dynamic link, transfer function, sea roughness, gain-frequency characteristic, overloading.

---

Sergey V. Shirokov – Head of Department.