

АНАЛИЗ ДИНАМИЧЕСКИХ ВОЗДЕЙСТВИЙ НА ОБЪЕКТЫ МОРСКОЙ ТРАНСПОРТИРОВКИ

Абакумов А.М., Широков С.В.

(СамГТУ, ГНПРКЦ «ЦСКБ-Прогресс», г. Самара, Россия)

In this paper the task of definition of the loadings influencing products of space-rocket techniques at their transportation by sea transport is considered. Dynamic influences on objects of sea transportation are analyzed. The loading diagram of model of researched object is made and the mathematical model is formed. Overloads in places of maintenance of a product for the chosen loading case are defined and influence of sea excitement on their value is analyzed.

В настоящее время Российской и Европейской стороной проводятся работы по созданию в Гвианском космическом центре комплекса системы запуска ракеты-носителя (РН) типа «Союз».

Доставку РН типа «Союз» в Гвианский космический центр планируется осуществлять поблочно в контейнерах с применением железнодорожного, морского и автомобильного транспорта.

Транспортирование блоков ракеты-носителя типа «Союз» с завода изготовителя на космодромы до настоящего времени выполнялось исключительно железнодорожным транспортом. Создание ракеты-носителя также осуществлялось с учетом обеспечения заданных прочностных характеристик при таком способе транспортирования.

Транспортирование блоков морским и автомобильным транспортом планируется осуществлять впервые, при этом продолжительность транспортирования морским транспортом будет составлять около 14 суток, транспортирование автомобильным транспортом – порядка нескольких часов.

Указанные обстоятельства вызывают необходимость проведения дополнительных исследований по анализу динамических воздействий, которые блоки ракеты-носителя (изделие) воспринимают в местах их опирания со стороны стапелей и кронштейнов.

Упрощенная расчетная схема модели исследуемого объекта приведена на рисунке 1. Кинематические воздействия со стороны палубы судна передаются на изделие эквивалентной массы m_2 через упругие элементы с демпфированием, отражающие динамические характеристики элементов крепления изделия к палубе [1]. В общем случае изделие может устанавливаться с использованием виброизолирующих элементов.

При разработке математической модели объекта вводятся промежуточные координаты (переменные):

Z_b – вертикальное перемещение уровня воды;

Z_c – вертикальное перемещение судна;

Z_i – вертикальное перемещение изделия.

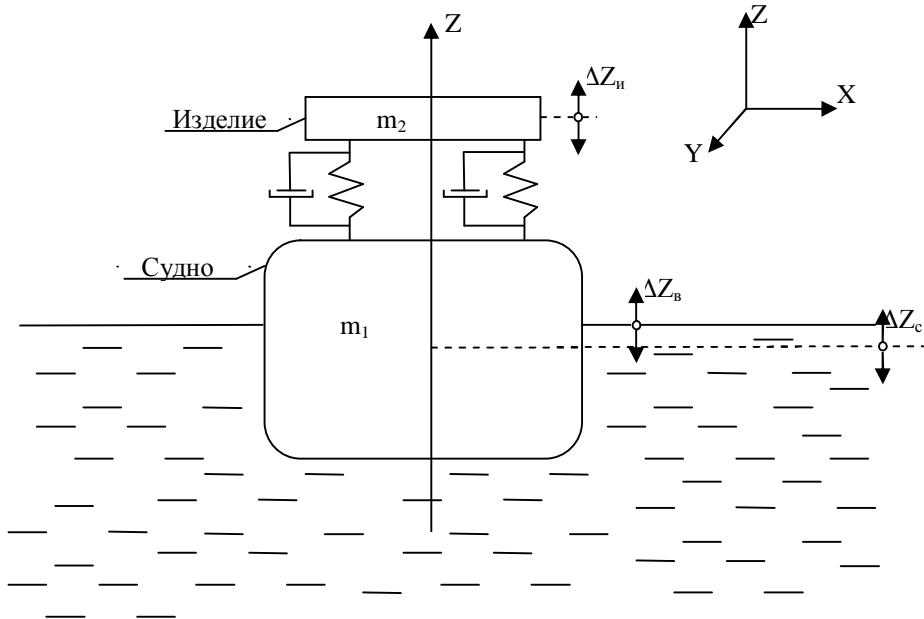


Рис. 1. Расчетная схема модели объекта

С учетом задачи исследования сформируем математическую модель объекта для приращений переменных, устанавливающую взаимосвязь между параметрами морского волнения и параметрами воздействия на транспортируемое изделие. При этом в структуре объекта могут быть выделены два динамических звена [2], показанные на рисунке 2.

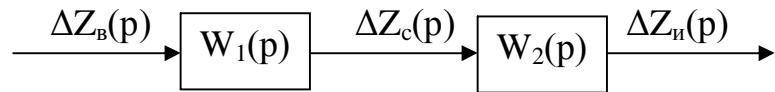


Рис. 2. Математическая модель объекта

В качестве входного возмущающего воздействия Z_b принято воздействие на судно морского волнения. Судно в результате этого воздействия испытывает следующие виды колебаний: бортовую, килевую и вертикальную качку, а также поперечно-горизонтальные, бортовые колебания и рыскание. При упрощенной оценке взаимосвязанную линейную систему уравнений качки разделяют на отдельные виды колебаний судна: уравнения бортовой, килевой и вертикальной качки [3]. На практике обычно пренебрегают только продольно-горизонтальной качкой и разделяют линейную систему из шести уравнений на две: одну из трех взаимосвязанных уравнений (поперечно-горизонтальные, бортовые колебания и рыскание) и вторую из двух уравнений (вертикальная и килевая качка).

Для рассматриваемой задачи в предположении о том, что изделие закреплено вблизи центра палубы, основной составляющей воздействия на объект является вертикальная качка судна. Определим динамические свойства судна для вертикальных колебаний с учетом общепринятых допущений [3]: обводы корабля в пределах изменения его осадки – прямостенные; ширина корабля мала по сравнению с длинной волны. Последнее допущение позволяет заменить действительное волновое движения жидкости воображаемым колебанием всей массы окружающей корабль воды вверх и вниз по гармоническому закону.

С учетом отмеченного уравнение движения корабля будет иметь вид

$$m \frac{d^2 \Delta Z_C}{dt^2} = F - P, \quad (1)$$

где m_1 – масса судна, F – подъемная (выталкивающая) сила, P – вес судна.

Приращение выталкивающей силы (силы плавучести):

$$\Delta F = F - P = S\gamma(\Delta Z_B - \Delta Z_C), \quad (2)$$

где S – площадь ватерлинии, γ – удельный вес вытесненной воды.

Преобразуем уравнение (2) к виду

$$\frac{\Delta F}{\Delta Z_B - \Delta Z_C} = S\gamma,$$

и введем коэффициент жесткости $K = S\gamma$, тогда уравнение (1) можно записать в форме:

$$m_1 \frac{d^2 \Delta Z_C}{dt^2} + K \Delta Z_C = \Delta Z_B.$$

Приведенное уравнение записано без учета вязкого трения бортов судна и воды.

С учетом вязкого трения получим

$$m_1 \frac{d^2 \Delta Z_C}{dt^2} + \beta_1 \frac{d \Delta Z_C}{dt} + K \Delta Z_C = K \Delta Z_B \quad (3)$$

здесь β – коэффициент вязкого трения бортов корабля о воду.

Преобразуя уравнение (3) по Лапласу, получим:

$$K \left(\frac{m_1}{K} p^2 + \frac{\beta_1}{K} p + 1 \right) \Delta Z_C(p) = K \Delta Z_B(p)$$

Тогда передаточная функция судна относительно рассматриваемых переменных:

$$W(p) = \frac{\Delta Z_C(p)}{\Delta Z_B(p)} = \frac{1}{T_1^2 p^2 + 2\xi_1 T_1 p + 1}$$

где p – оператор Лапласа; T и ξ эквивалентная постоянная времени и коэффициент затухания, соответственно:

$$T_1 = \sqrt{\frac{m_1}{K}}, \quad \xi_1 = \frac{\beta_1}{2T_1 K}.$$

Найдем параметры полученной функции для судна типа “Тукан” со следующими характеристиками: длина наибольшая – 115,5 м, ширина - 20,38 м, осадка - 5 м, водоизмещение брутто 9125 тонн.

Для дальнейших расчетов примем:

$$m_1 = 9,125 \cdot 10^6 \text{ кг}, \quad S = 2000 \text{ м}^2, \quad \gamma = 1025 \text{ кг/м}^3,$$

$$\text{Соответственно: } K = 2,05 \cdot 10^6 \text{ кг/м}, \quad T_1 = 2,11.$$

Примем $\xi_1 = 0,8$.

Для второго звена в структуре объекта, отражающего динамику связи между перемещением Z_H изделия и кинематическим воздействием Z_C , уравнение движения может быть записано в виде:

$$m_2 \frac{d^2 \Delta z_H}{dt^2} = k_2 (\Delta z_C - z_H) - z_H \beta \frac{dz_H}{dt}$$

После преобразований и перехода к изображениям получим передаточную функцию второго звена

$$W_2(p) = \frac{\Delta z_u(p)}{\Delta z_c(p)} = \frac{1}{T_2^2 p^2 + 2\xi_2 T_2 p + 1},$$

где

$$T_2 = \sqrt{\frac{m_2}{k_2}}; \quad \xi_2 = \frac{\beta_2}{k_2 2T_2}.$$

Таким образом, динамическая модель рассматриваемого объекта, связывающая перемещение изделия Z_H с возмущением Z_B , может быть представлена в виде передаточной функции

$$W'_o(p) = \frac{\Delta Z_H(p)}{\Delta Z_B(p)} = W_1(p)W_2(p) = \frac{1}{(T_1^2 p^2 + 2\xi_1 T_1 p + 1)(T_2^2 p^2 + 2\xi_2 T_2 p + 1)},$$

Учитывая, что силовое воздействие на изделие определяется величиной ускорений $\varepsilon = \frac{d^2 Z_H}{dt^2}$, получим дополнительно передаточную функцию объекта, приняв за выходную величину ускорение ε .

Используя преобразование Лапласа можно записать

$$\varepsilon(p) = p^2 Z_H(p),$$

Тогда искомая передаточная функция будет

$$W_o(p) = \frac{\Delta \varepsilon(p)}{\Delta Z_B(p)} = p^2 W'_o(p) = \frac{p^2}{(T_1^2 p^2 + 2\xi_1 T_1 p + 1)(T_2^2 p^2 + 2\xi_2 T_2 p + 1)} \quad (4)$$

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

Определим характеристики возмущающего воздействия.

За возмущающее воздействие принимается морское волнение. Волнение представляет собой процесс колебания морской поверхности и характеризуется элементами профиля, представленными на рисунке 3 [4].

Здесь:

λ – длина волны, h – высота волны, r – волновая ордината, a – угол ветрового склона.

Частицы воды в волне совершают движение по замкнутым траекториям, что создает эффект бегущей волны, гребень которой перемещается в определенном направлении. Это явление характеризуется периодом волн τ , угловой частотой

$$\omega = 2\pi/\tau \quad (5),$$

а также скоростью перемещения профиля волны

$$c = \sqrt{\frac{g\lambda}{2\pi}} \quad (6).$$

Период волны связан со скоростью перемещения профиля и длиной волны следующей формулой

$$c = \frac{\lambda}{\tau} \quad (7)$$

В отечественной практике стандартным показателем интенсивности волнения считается высота волн трехпроцентной обеспеченности – $h_{3\%}$. Под высотой волн трехпроцентной обеспеченности понимают такую высоту, вероятность превышения которой составляет 3%.

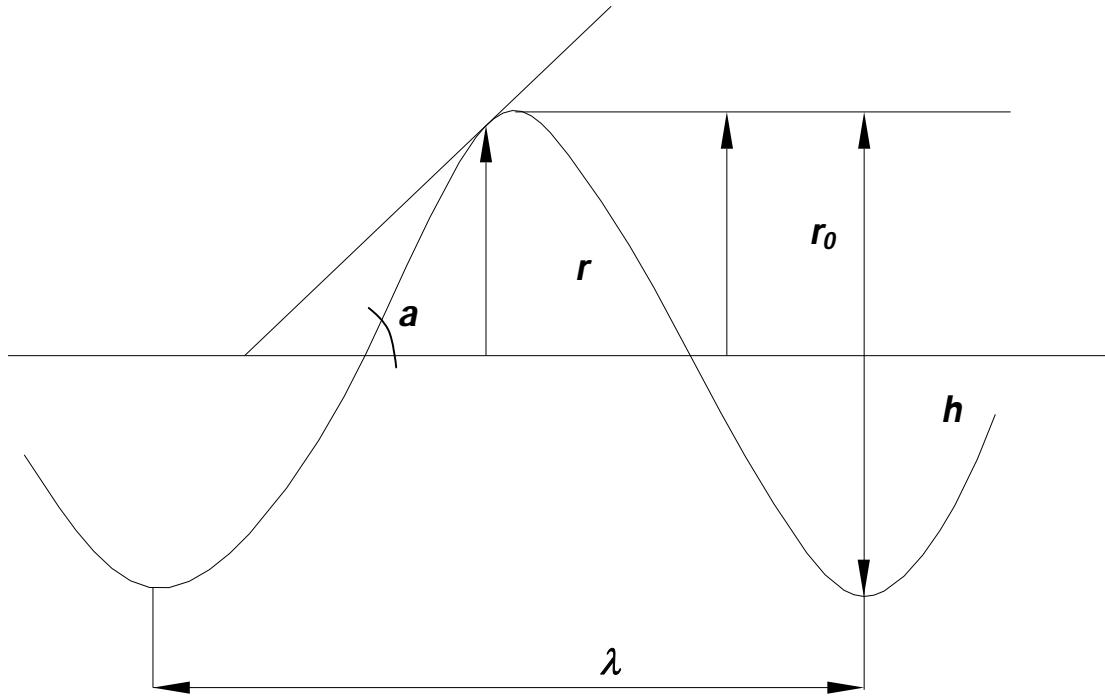


Рис. 3. Профиль регулярной волны

При проектировании судов за расчетное принимается волнение силой 3 балла, которое рассматривается как режим, при котором эксплуатационные характеристики судна не должны изменяться [5]. Волнению силой 3 балла соответствует высота волны $h_{3\%}=0,75?1,25$ м. Волнению силой 6 баллов, которое характеризуется как сильное, соответствует $h_{3\%}=3,5?6$ м.

По статистике крутизна волн в океанах колеблется в пределах $\frac{h_B}{\lambda} = \frac{1}{17} \div \frac{1}{23}$.

Используя приведенные выше статистические данные и формулы (5), (6), (7) можно определить угловую частоту волнения. Для волнения силой 3 балла ($h_{3\%}=1,25$) она составит $\omega_{1,25}=1,7$ рад/с. Для волнения силой 6 баллов ($h_{3\%}=3,5?6$) она составит $\omega_{3,5?6}=1,017?0,777$ рад/с.

Ордината регулярной бегущей волны в данной точке моря определяется зависимостью [4]:

$$r = r_0 \sin(\omega t + \Psi_r);$$

где Ψ_r – начальная фаза.

На основе полученной выше передаточной функции (4) с помощью программы CLASSIC получены нижеприведенные амплитудно-частотные характеристики объекта.

На рисунке 4 представлены амплитудно-частотные характеристики для случаев $\xi_1 = 0,8, \xi_2 = 0,9$ (нижняя кривая) и $\xi_1 = 0,8, \xi_2 = 0,5$ (верхняя кривая).

На рисунке 5 представлены амплитудно-частотные характеристики для случаев $\xi_1 = 0,8, \xi_2 = 0,9$ (нижняя кривая) и $\xi_1 = 0,7, \xi_2 = 0,6$ (верхняя кривая).

Анализ полученной на рисунке 4 характеристики показывает, что в интересующем диапазоне частот ω_i от 0,7 рад/с до 1,7 рад/с для параметров объекта, принятых выше, значение относительной амплитуды на выходе будет лежать в диапазоне $A(\omega_i) = 0,18 \div 0,21$.

Абсолютное значение амплитуды ε_0 ускорения $\varepsilon = \frac{d^2 Z_H}{dt^2}$ на выходе объекта для

известного значения амплитуды r_0 воздействия на входе определяется соотношением

$$\varepsilon_0(\omega_i) = A(\omega_i)r_0.$$

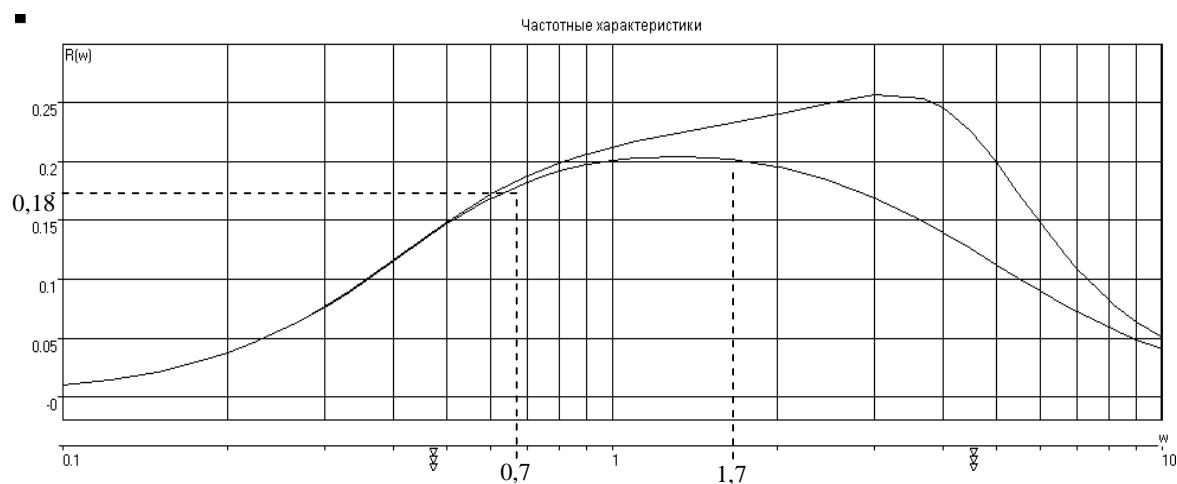


Рис. 4. АЧХ для $\xi_1 = 0,8, \xi_2 = 0,9$ (нижняя кривая) и $\xi_1 = 0,8, \xi_2 = 0,5$ (верхняя кривая)

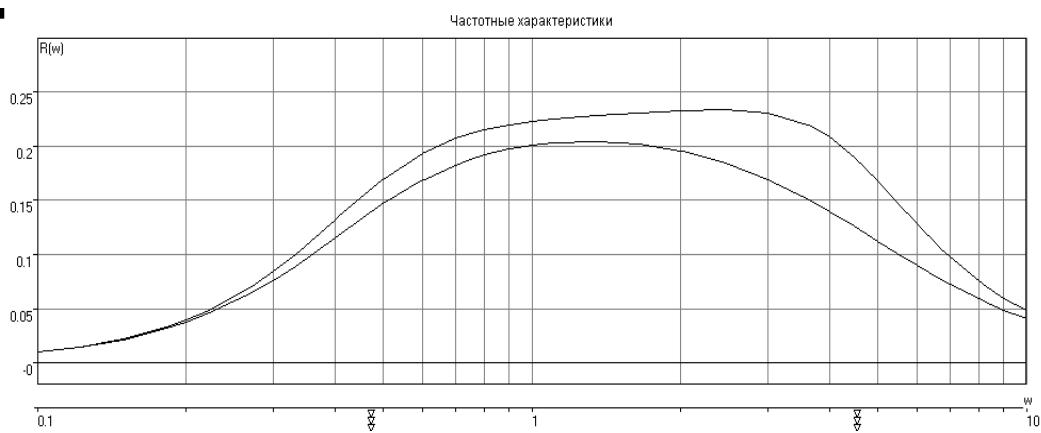


Рис. 5. АЧХ для $\xi_1 = 0,8, \xi_2 = 0,9$ (нижняя кривая) и $\xi_1 = 0,7, \xi_2 = 0,6$ (верхняя кривая)

Соответственно для высоты волны $h_b=1,25$ м, $r_0 = 0,625$ м ($\omega_{1,25}=1,7$ рад/с) ускорение точки закрепления изделия составит $0,2r_0=0,125$ м/с² (максимальная

перегрузка $n=1,0127g$). Для высоты волны $h_b=6$ м, $r_0=3$ м ($\omega_0=0,777$ рад/с) ускорение точки закрепления изделия составит $0,18r_0=0,54$ м/с² (максимальная перегрузка $n=1,055g$).

Характеристика на рисунке 4 показывает, что в случае уменьшения коэффициента демпфирования второго звена произойдет увеличение значения амплитудно-частотной характеристики начиная с частот 0,6?0,7 рад/с. Из характеристики на рисунке 5 следует, что в случае уменьшения коэффициента демпфирования обоих звеньев произойдет увеличение значения амплитудно-частотной характеристики, начиная с частот 0,2?0,3 рад/с.

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 приведенных моделях введено упрощающее предположение о размещении изделия вблизи центра тяжести корабля. Если оно не выполняется, то для решения задачи необходимо учитывать также бортовую и килевую качку корабля. В статье проанализирован только режим установившихся колебаний, однако полученные модели позволяют рассмотреть также переходные процессы и получить оценки перегрузок при случайном характере воздействий.

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

Надійшла до редколегії 12.05.2009 р.

АНАЛИЗ ДИНАМИЧЕСКИХ ВОЗДЕЙСТВИЙ НА ОБЪЕКТЫ МОРСКОЙ ТРАНСПОРТИРОВКИ

Абакумов А.М., Широков С.В.

Стаття присвячена розробці методики оцінки перевантаження, що впливає на виріб при морському транспортуванні, а також вивченю впливу зміни параметрів об'єкту на перевантаження, що виникають в точках закріплення об'єкту. У статті проаналізований лише режим сталіх коливань, проте отримані моделі дозволяють розглянути також переходні процеси і отримати оцінки перевантажень при випадковому характері дій.

транспортирование, ракета-носитель, математическая модель, перегрузка