

Таблица 1. Объем выборки для одностороннего толерантного предела

Уровень $1 - \alpha$ доверительной вероятности	Вероятность превышения		
	0.90	0.95	0.99
0.90	22	45	230
0.95	29	59	299
0.99	44	90	459

Таблица 2. Значения коэффициента для определения одностороннего толерантного предела

Объем выборки	Вероятность превышения		
	0.90	0.95	0.99
45	1.669	2.092	2.897
60	1.609	2.022	2.807
90	1.542	1.944	2.706
300	1.417	1.800	2.522
500	1.385	1.763	2.475
∞	1.282	1.645	2.326

сящий от количества наблюдений n и уровня доверительной вероятности.

Объем выборки для получения одностороннего толерантного предела можно получить, пользуясь

данными табл. 1.

Значения коэффициента K для определения односторонних толерантных пределов в случае нормального распределения можно получить, используя данные табл. 2 для уровня доверительной вероятности 0.95.

Данный подход нашел практическое применение при пусках ракеты-носителя «Зенит-3SL».

1. Бабаков И. М. Теория колебаний. — М.: ГИТТЛ, 1969.
2. Хан Г., Шапиро С. Статистические модели в инженерных задачах. — М.: Мир, 1969.
3. Шиманский Ю. А. Динамический расчет судовых конструкций. — Л.: Судпромгиз, 1963.

ESTIMATE OF PREDICTABLE LOADING ON THE BASE CROSS-SECTION OF ILV "ZENIT-3SL"

O. E. Arlekinova, A. A. Vasilenko

A methodology for solving the task of reliable launch of vehicles from the ocean platform proceeding from loading and strength within the framework of the Sea Launch Project is given. Assumptions on calculation scheme taken on the base of physical conditions are given in detail. Adopted calculation scheme allowed to estimate precisely enough a load at the launch vehicle base which is the most critical during standing before launch.

УДК 629.76.085.5:629.764

ИССЛЕДОВАНИЕ ПАРАМЕТРОВ НАГРУЖЕНИЯ РКН «ЗЕНИТ-3SL» ПРИ ЕЕ СТОЯНКЕ НА СТАРТОВОЙ ПЛАТФОРМЕ

© О. Э. Арлекинова

Державне конструкторське бюро «Південне» ім. М. К. Янгеля

Розглянуто задачу розрахунку навантажень на ракету-носіє при її стоянці перед стартом з плавучої морської платформи. Задача є новою і важливою для забезпечення безпечного старту, тому розглянуто три різні варіанти її розв'язування: методом максимальних параметрів, методом побудови спектру відгуку шуканого параметра навантаження та експериментальним методом з використанням показів датчиків про параметри руху стартової платформи. Найкращу кореляцію з експериментальними даними дає метод побудови спектру відгуку.

В данной статье рассмотрена задача расчета нагрузок, действующих на ракету-носитель при ее стоянке перед стартом и возникающих из-за воздействия волн на стартовую платформу, и проведено исследование результатов расчета нагрузок, полученных различными методами: методом максимальных параметров, методом построения спектра отклика изгибающего момента и эксперименталь-

ным методом с использованием показаний датчиков о параметрах колебания стартовой платформы.

Поскольку два из этих методов используют энергетический спектр колебаний поверхности моря, то рассмотрим вначале спектральный метод нахождения параметров нагружения ракеты-носителя и параметров колебания стартовой платформы в районе стартового стола.

При определении внешних нагрузок на ракету-носитель примем допущение, что ракета является частью стартовой платформы как твердого тела и воспользуемся амплитудно-частотными характеристиками платформы, которые представляют собой перемещения ее центра тяжести и имеют вид

$$x(\omega, \Phi) = x_0(\Phi) \exp(i\omega t),$$

где $x_0(\Phi)$ — вектор амплитуд, состоящий из трех поступательных и трех вращательных составляющих; ω — круговая частота; Φ — угол прихода волн по отношению к продольной оси платформы.

Скорости и ускорения в центре тяжести платформы находятся путем дифференцирования вектора перемещений x :

$$\dot{x}(\omega, \Phi) = i\omega x_0(\Phi) \exp(i\omega t),$$

$$\ddot{x}(\omega, \Phi) = -\omega^2 x_0(\Phi) \exp(i\omega t).$$

Для того чтобы определить вектор перемещений в районе опорного кольца ракеты, разложим вектор перемещений центра тяжести платформы на поступательную и вращательную составляющие:

$$x(\omega, \Phi) = u(\omega, \Phi) + \varphi(\omega, \Phi).$$

Поступательные перемещения в районе опорного кольца ракеты вычислим как

$$u_{РКН}(\omega, \Phi) = u(\omega, \Phi) + \varphi(\omega, \Phi) \times r,$$

где r — радиус-вектор расстояния между центром тяжести стартовой платформы и опорным кольцом ракеты. Аналогичным образом определим вектор поступательных ускорений $u(\omega, \Phi)$. Вращательные составляющие векторов перемещений и ускорений остаются без изменений.

Таким образом, определены два вектора, представляющие собой передаточные функции для перемещений и ускорений в районе опорного кольца ракеты. Теперь можно построить вектор внешней нагрузки, действующей на ракету-носитель, а также функции изгибающего момента и перерезывающей силы в произвольном сечении ракеты.

Поскольку передаточные функции перемещений, скоростей и ускорений были определены как функции, зависящие от круговой частоты внешнего воздействия ω и угла прихода волн Φ , то и построенные передаточные функции каждого из параметров нагружения РКН являются функциями тех же переменных. В дальнейшем будем обозначать передаточную функцию искомого параметра как $H(\omega, \Phi)$.

Пусть состояние моря задается двумерным энергетическим спектром $S(\omega, \varphi)$, представляющим собой функцию круговой частоты ω и азимутального

угла φ . Спектр отклика для любого из параметров, передаточная функция которого $H(\omega, \Phi)$, вычисляется как [2]:

$$R(\omega, \varphi, \Phi_K) = S(\omega, \varphi) H(\omega, \varphi + \Phi_K)^2,$$

где Φ_K — курс стартовой платформы.

Стандартное среднее квадратичное отклонение находится как

$$\sigma(\Phi_K) = \left(\int_{\omega_1}^{\omega_2} \int_0^{2\pi} R(\omega, \varphi, \Phi_K) d\varphi d\omega \right)^{1/2},$$

где ω_1, ω_2 — низшая и высшая круговые частоты спектра соответственно.

Статистические закономерности, изученные на основе экспериментальных и натурных исследований, показывают, что распределение волновых колебаний свободной поверхности моря достаточно хорошо аппроксимируется распределением Гаусса, а распределение размахов волн (пиковые значения) близко к распределению Релея [1]. В этом случае максимум наиболее вероятного значения может быть оценен путем умножения стандартного среднего квадратичного отклонения на коэффициент $\sqrt{2 \ln N}$, а для вероятности превышения, равной α , соответствующий коэффициент равен $\sqrt{2 \ln(N/\alpha)}$, где N — количество пиков.

Для всех трех методов была использована одна и та же балочная модель ракеты. Учет динамической составляющей, возникающей от собственных колебаний ракеты-носителя, проводился методом приведения [4]. Для сравнения результатов, полученных при расчетах различными методами, в качестве параметра нагружения было выбрано значение изгибающего момента в опорном сечении ракеты-носителя.

Для расчетов методом максимальных параметров и методом построения спектра отклика изгибающего момента был использован реальный спектр волнения моря, полученный с метеорологического буя, расположенного вблизи точки старта. Для расчетов экспериментальным методом были использованы записи параметров колебания стартовой платформы, произведенные в то же время, что и регистрация энергетического спектра состояния моря.

В методе максимальных параметров вычислялись максимальные значения ускорений и углов наклона стартовой платформы в районе опорного кольца ракеты-носителя, а затем данные параметры внешнего воздействия прикладывались к балочной модели ракеты. В данном подходе предполагалось, что все углы и ускорения достигают своего максимума одновременно, причем их комбинация такова, что приводит к максимальному нагружению ракеты-но-

сителя. Значения максимальных ускорений и углов наклона стартовой платформы вычислялись с использованием энергетического спектра состояния моря и амплитудно-частотные характеристик стартовой платформы.

В методе построения спектра отклика изгибающего момента на основе амплитудно-частотных характеристик стартовой платформы и ракеты-носителя вычислялась передаточная функция изгибающего момента в опорном сечении ракеты с учетом фазовых характеристик параметров внешнего воздействия, а затем, используя энергетический спектр воздействия моря, находился спектр отклика для этого изгибающего момента.

Данные, полученные при расчетах этими методами, сравнивались со значениями изгибающего момента в опорном сечении РКН, вычисленном по показаниям датчиков, записывавших изменение во времени параметров колебания СП в районе стартового стола с частотой 10 измерений за секунду. Запись таких параметров колебания как углы бортовой и килевой качки, соответствующих им угловых ускорений и линейных ускорений вдоль продольной, боковой и вертикальной осей платформы производилась в течение 20 мин. Это обусловлено тем, что по результатам многочисленных данных натурных наблюдений можно приближенно считать волновой процесс случайным стационарным процессом. При этом квазистационарную совокупность, для которой сила волнения остается практически неизменной, можно получить в результате непрерывной регистрации волн в течение 15—20 мин [3].

В качестве критерия были использованы значения изгибающих моментов в основании ракеты-носителя, полученные при расчетах с использованием показаний датчиков, которые полагались равными 100 %. В этом случае значения изгибающих моментов, вычисленных путем построения спектра отклика изгибающего момента, составили 90—115 %, а значения изгибающих моментов, вычисленных путем построения спектров откликов углов и ускорений, составили 130—150 %. Для того чтобы оценить, какой вклад вносит погрешность вычисления максимальных углов и ускорений, вычисленных с использованием спектра, и какой

вклад вносит потеря фазовых характеристик, также были проведены расчеты изгибающих моментов с использованием максимальных значений углов и ускорений, взятых в соответствии с показаниями датчиков, при этом все углы и ускорения достигали своего максимума одновременно. Значения изгибающих моментов в данном случае составили 120—130 %.

Исследование результатов расчета изгибающего момента в основании ракеты-носителя, полученных различными методами, показали, что наилучшую корреляцию с экспериментальными данными дает метод построения спектра отклика изгибающего момента.

Очевидно, что наиболее точные данные о параметрах колебания стартовой платформы и параметрах нагружения ракеты-носителя можно получить при помощи датчиков. В случае отсутствия этих данных предпочтительным является метод построения спектра отклика изгибающего момента. Метод максимальных параметров может быть использован на этапе проектирования в том случае, если фирма-разработчик стартовой платформы предоставляет данные только о максимальных параметрах колебания стартовой платформы.

1. Крылов Ю. М., Стрекалов С. С., Цыплухин В. Ф. Ветровые волны и их воздействие на сооружения. — Л.: Гидрометиздат, 1976.
2. Свешников А. А. Прикладные методы теории случайных функций. — М.: Наука, 1968.
3. Смирнов Г. И. Океанология. — М.: Высшая школа, 1987.
4. Шиманский Ю. А. Динамический расчет судовых конструкций. — Л.: Судпромгиз, 1963.

STUDY OF LOAD PARAMETERS OF ILV "ZENIT-3SL" DURING ITS STANDING AT THE LAUNCH PLATFORM

O. E. Arlekinova

The task of calculation of loads on launch vehicle during ILV standing before launch from ocean platform. The task is a new one and it is important for ensuring a safe launch. Three options for solving this task are examined: by method of maximal parameters, by method of building a response spectrum of searched parameter and by an experimental method with using data from sensors indications of parameters of launch platform movements. The method of building a response spectrum gives the best correlation with experimental data.