

УДК 629.7
Д 26

О КРИТЕРИИ НА РАЗРЕШЕНИЕ ПУСКА РАКЕТЫ-НОСИТЕЛЯ С МОРСКОЙ ПЛАТФОРМЫ

А. В. Дегтярев, канд. экон. наук;
А. Э. Кашанов, канд. техн. наук,
И. А. Василенко, аспирант

Государственное предприятие «Конструкторское бюро «Южное» им. М. К. Янгеля, г. Днепропетровск

Аннотация. Разработаны и применены в практике эксплуатации комплекса «Морской старт» критерии возможности осуществления пуска ракеты космического назначения в виде параметров внешних воздействий и величин прогнозируемых нагрузок в опорном сечении ракеты-носителя «Зенит-3SL» при предстартовой подготовке на морской стартовой платформе.

Ключевые слова: морская стартовая платформа, критерий возможности пуска ракеты-носителя, ветровые и волновые условия, прогнозируемая нагрузка, прочность, контроль нагружения.

Анотація. Розроблені та застосовані в практиці експлуатації комплексу «Морський старт» критерії можливості здійснення пуску ракети космічного призначення у вигляді параметрів зовнішніх впливів та величин прогнозованих навантажень в опорному перерізі ракети-носія «Зеніт-3SL» при передстартовій підготовці на морській стартовій платформі.

Ключові слова: морська стартова платформа, критерій можливості пуску ракети-носія, вітрові та хвильові умови, прогнозовані навантаження, міцність, контроль навантаження.

Abstract. Possibility criteria of satellite vehicle launching in the form of external actions and predicted load values characteristics in Zenit-3SL reference section during pre-launch preparation on maritime launch platform are developed and used in operational practice of «Morskoy Start» complex.

Keywords: maritime launch platform, possibility criterion of satellite vehicle launch, wind and wave conditions, predicted load, strength, loading control.

ПОСТАНОВКА ПРОБЛЕМЫ

Выбор критериев возможности осуществления пуска ракеты космического назначения «Зенит-3SL» по программе «Морской старт» со стартовой платформы в условиях воздействия морского волнения и ветрового потока является важной и актуальной задачей. Впервые в практике пусков ракет-носителей с морской стартовой платформы (СП) в ГП «КБ «Южное» была поставлена и решена задача экспериментального определения нагрузок в расчетных сечениях ракеты непосредственно перед стартом. *Актуальность* этой проблемы усугублялась критичностью несущей способности конструкции ракеты к нагрузкам при колебательных движениях стартовой платформы в условиях морского волнения, с одной стороны, и необходимостью, с другой стороны, надежного определения условий внешней среды, при которых возможны подготовка, заправка и пуск ракеты с гарантированным обеспечением нормативных прочностных характеристик.

Данная задача решается впервые.

ЦЕЛЬ СТАТЬИ — разработать комплекс мероприятий, позволяющих определить критерии погодных условий, а именно высоту и направление волн, скорость и направление ветра, при которых возможно осуществить пуск с морской СП; а также разработать систему расчетов прогнозируемой нагрузки в корневом сечении РН при реальных внешних условиях.

ИЗЛОЖЕНИЕ ОСНОВНОГО МАТЕРИАЛА

Использование морской стартовой платформы позволяет производить пуски ракет-носителей с экватора, что наиболее выгодно с энергетической точки зрения. Однако качка и наклоны плавучей стартовой платформы в процессе подготовки пуска приводят к увеличению нагрузки на ракету-носитель по сравнению с наземным стартом. Поэтому производство пусков ракет-носителей с плавучей СП требует решения ряда проблем, направленных на выработку критериев возможности проведения пуска РН, а также контроля нагружения ракеты-носителя в ходе предстартовой подготовки.

Авторами при непосредственном участии специалистов ГП «КБ «Южное» был предложен и реализован ряд мероприятий, обеспечивающих определение критериев возможности проведения пуска ракеты космического назначения (РКН).

В качестве критериев возможности осуществления пуска РКН рассмотрены:

- 1) внешние условия: высота волны, скорость ветра;
- 2) параметры движения (качки) СП: продольные перемещения, поперечные перемещения, вертикальные перемещения, угол бортовой качки, угол килевой качки;
- 3) характеристики нагружения элементов конструкции РКН и космического аппарата (КА) в расчетных сечениях: величины нагрузки в корневом сечении РН, величины нагрузки на элементы КА;

4) коэффициенты запаса прочности, определяемые путем сравнения расчетной нагрузки с величиной несущей способности элементов.

Ниже изложено решение указанной проблемы в процессе создания и эксплуатации международного ракетно-космического комплекса «Морской старт», осуществляющего запуски космических аппаратов ракетой-носителем «Зенит-3SL» с морской стартовой платформы.

Колебания СП возникают вследствие волнения моря, воздействия ветра и технологических операций по подготовке пуска. С помощью метеорологического буя, установленного на экваторе в районе пуска, проведены исследования метеорологических условий, высот и направлений распространения волн, скорости и направления ветра в зависимости от времен года, для каждого месяца установлены преимущественные направления ветра и волн.

Волнение моря вызывает качку стартовой платформы. Качка СП является сложным пространственным движением, для описания которого используют шесть степеней свободы:

- перемещение в продольном направлении СП (продольный снос);
- перемещение в поперечном направлении СП (поперечный снос);
- перемещение в вертикальном направлении (подъем);
- вращение относительно продольной оси (бортовая качка);
- вращение относительно поперечной оси (килевая качка);
- вращение относительно вертикальной оси (рысканье).

Углы бортовой и килевой качки при высоте волны 2,5 м могут достигать 1° .

Технологические операции по подготовке пуска предусматривают перемещения по СП установщика, который вывозит ракету космического назначения из ангара хранения и устанавливает на пусковой стол. Вследствие этих перемещений СП получает наклоны, которые называют статическими углами. Статический угол при вращении вокруг поперечной оси называется дифферентом, при вращении вокруг продольной оси — креном.

Действие постоянно направленного ветра приводит также к появлению статических наклонов СП, величины которых составляют $0,2 \dots 0,8^\circ$.

Для уменьшения моментов, возникающих вследствие статических наклонов, разработана система коррекции крена и дифферента СП. Она имеет датчики, измеряющие отклонение платформы от горизонтального положения. Сигнал датчиков преобразуется в команды управления насосами, которые перекачивают воду между балластными резервуарами колонного

типа до достижения СП горизонтального положения. Система обеспечивает горизонтальность СП по крену и дифференту в процессе заправки РКН и при действии волн и ветра с точностью $\pm 0,2^\circ$. Для компенсации наклонов СП при перемещении установщика с РКН используется процедура предварительного наклона: СП до начала движения установщика наклоняется в сторону, противоположную движению установщика, после окончания движения установщика СП выравнивается.

По данным метеорологического буя изучены ветровые и волновые условия в районе пуска, на основе которых, с целью уменьшения качки, СП ориентируется в направлении преимущественного распространения волн. Описанные мероприятия показали возможность осуществления пуска при следующих погодных условиях: волнах высотой до 2,5 м и скорости ветра до 10 м/с — и соответствующих им параметрам качки СП.

Исследования нагрузок в расчетных сечениях элементов конструкции РН, проведенные для анализа влияния внешних воздействий (погодных условий, волн, ветра, параметров качки СП и предстартовых технологических операций) на возможность пуска, определили элемент (корневое сечение РН), несущая способность которого минимальна.

На основании этих исследований для контроля нагружения РН во время предстартовой подготовки и определения критерия возможности проведения пуска РН в ГП «КБ «Южное» при непосредственном участии авторов разработана система расчета прогнозируемой нагрузки, которая работает в течение всего времени подготовки пуска. При этом расчет нагрузки производится непосредственно перед вывозом РН из ангара и установкой на СП; запуском программы стартовой подготовки; заправкой РН компонентами топлива; отводом от РН установщика.

Приведем некоторые методические положения, принятые при расчете прогнозируемой нагрузки, действующей в корневом сечении РН при предстартовой подготовке на морской СП в условиях качки и ветра, изложенные в работе [2].

Внешнее воздействие большой интенсивности, характеризующееся многообразием типов морских волн с переменными во времени амплитудами и периодами колебаний, сложный характер их взаимодействия со стартовой платформой [1], упругость корпусов СП и РН, наличие больших масс жидкости в топливных баках РН и разгонном блоке (РБ) и ряд других факторов чрезвычайно усложняют решение задачи [3, 4]. Точное решение такой задачи очень сложно, поэтому целесообразно использовать способ разложения по собственным формам колебаний основной системы, который состоит в разложении деформаций системы по формам собственных колебаний

и учете конечного числа низших форм колебаний, которое выбирается в каждом случае в зависимости от условий нагружения, динамических характеристик системы и требуемой точности расчетов [1, 2].

Применение этого способа к упругим системам с распределенными параметрами предполагает возможность представления любого перемещения элементов этих систем в виде суммы произведений функций только времени и функций только координаты. В качестве обобщенных координат берутся независимые функции только времени, число которых соответствует числу степеней свободы:

$$f(x, t) = \sum_{i=1}^n g_i(t) \cdot \varphi_i(x),$$

где $f(x, t)$ — перемещение точек системы; $\varphi_i(x)$ — i -я собственная форма колебаний основной системы; $g_i(t)$ — коэффициенты разложения, определяемые из решения системы обыкновенных дифференциальных уравнений:

$$M_i \ddot{q}_i + C_i \dot{q}_i = Q_i,$$

где M_i , C_i , Q_i — приведенные к собственным формам основной системы массы, жесткости и активные силы.

При расчете нагрузки в корневом сечении РН приняты следующие допущения:

1. При движении вдоль продольной оси РН считается абсолютно твердым телом, положение которого определяется одной степенью свободы.

2. При движении РН вдоль поперечной и боковой осей она считается упругим телом, положение которого определяется конечным числом степеней свободы. При описании поперечных колебаний корпус РН схематизируется в виде балки переменного поперечного сечения.

Исходные данные для расчета прогнозируемой нагрузки в корневом сечении поступают как фактически замеренные параметры внешних воздействий, которые включают в себя:

1) значения скорости ветра и его направления. По результатам измерений определяются скорость ветра на высоте 10 м над уровнем моря и направление ветра относительно продольной оси СП, для чего используются соотношения

$$V(h) = V_0 \left(\frac{h}{10} \right)^{0,1};$$

$$\varphi_{в,СП} = \varphi_{СП} - \varphi_{в},$$

где $V(h)$ — скорость на высоте h (м); V_0 — скорость на высоте 10 м; $\varphi_{в,СП}$ — направление ветра относительно СП; $\varphi_{СП}$ — азимут направления продольной оси СП; $\varphi_{в}$ — азимут направления ветра;

2) определенную высоту и направление волн;

3) измеренные специальным прибором параметры колебания СП в районе стартового стола.

Алгоритм расчета прогнозируемой нагрузки в корневом сечении РН:

1. Получение данных параметров внешних воздействий.

2. Вычисление прогнозируемой нагрузки в корневом сечении по формуле

$$F = f_{о.с.} T + f_M \frac{4M_{\Sigma}}{D},$$

где $f_{о.с.}$, f_M — коэффициенты безопасности при нагружении осевой силой и изгибающим моментом соответственно; D — диаметр РН.

Суммарные составляющие изгибающего момента в продольной плоскости СП M_x и в поперечной плоскости M_y получают арифметическим суммированием изгибающих моментов от качки, статических углов и воздействия ветра.

Суммарный изгибающий момент в корневом сечении РН рассчитывают по формуле

$$M_{\Sigma} = \sqrt{M_x^2 + M_y^2} + M_n,$$

где M_n — момент от неточности установки РН в вертикальное положение.

Осевую силу T рассчитывают по формуле

$$T = \frac{G}{g} \ddot{z}_a,$$

где G — вес РН.

3. Нахождение максимального значения прогнозируемой нагрузки F_{\max} .

4. Представление результатов расчета в табличном и графическом виде.

Блок-схема расчета прогнозируемой нагрузки показана на рисунке.

По результатам измерения параметров ветра, качки и наклонов СП определяется нагрузка в корневом сечении РН, которая сравнивается с допустимой, и на основе этого формируется заключение о возможности проведения пуска.

В табл. 1 приведены (для примера) величины исходных параметров.

Результаты расчета представляются в форме табл. 2.

Принятие решения о продолжении подготовки РН к пуску или ее отмене осуществляется руководителем запуска, при этом используется информация о прогнозируемой нагрузке в корневом сечении РН и КА и сравнение их с величиной допустимой нагрузки.

Коэффициент запаса прочности определяется по формуле

$$\eta = \frac{N_{\text{доп}}}{N_{\text{расч}}}$$

и должен быть больше единицы.

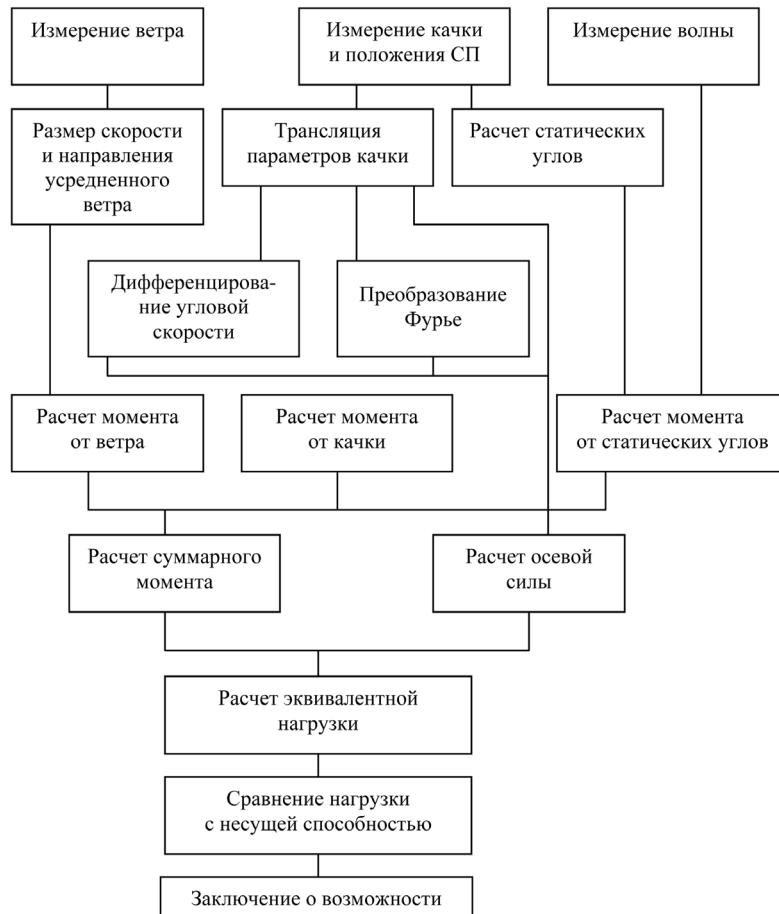


Рис. 1. Блок-схема расчета прогнозируемой нагрузки

Таблица 1. Исходные данные для расчета нагрузки

Параметр	Единицы измерения	Значение
Высота волн	м	1,9
Направление волны	град	100
Скорость ветра	м/с	5,4
Направление ветра	град	7,77
Статический угол дифферента	град	-0,05
Статический угол крена	град	0,01
Суммарный угол крена	град	0,82
Суммарный угол дифферента	град	0,78
Продольное ускорение	м/с ²	-0,04
Боковое ускорение	м/с ²	-0,08
Вертикальное ускорение	м/с ²	0,11
Угловое ускорение крена	град/с ²	0,1
Угловое ускорение дифферента	град/с ²	0,08

Таблица 2. Результаты расчета прогнозируемой нагрузки в корневом сечении ракеты космического назначения

Параметр	Единицы измерения	Коэффициент запаса	Процент допустимой нагрузки
Осевая эквивалентная сила	тс	1,09	0,92

ВЫВОДЫ

1. Разработанный комплекс мероприятий позволил определить критерии погодных условий, а именно высоту и направление волн, скорость и направление ветров, при которых возможно осуществление пуска с морской стартовой платформы. Эти результаты являются первичными критериями осуществления пуска РКН и используются для планирования пусков.

2. Конкретные погодные условия в момент пуска могут отличаться от проектных, что окажет влияние

на величину нагрузки в корневом сечении. Нагрузка будет зависеть и от функционирования системы коррекции крена, и от дифферента в условиях подготовки конкретного пуска.

Разработка системы расчета прогнозируемой нагрузки в корневом сечении РН при реальных внешних условиях позволяет определить окончательный критерий осуществления пуска ракеты космического назначения «Зенит-3SL» с морской стартовой платформы и повысить вероятность возможности проведения пуска.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] **Арлекинова, О. Э.** Методы расчета нагрузок, действующих на ракету при стоянке на морской стартовой платформе [Текст] / дис. ... канд. техн. наук: ДК № 026929 : защищена 15.10.04; утв. 15.12.2004 / О. Э. Арлекинова. — Х., 2004. — 176 с.
- [2] **Дегтярев, А. В.** Определение нагрузок в опорном сечении РН при стоянке на пусковом столе морской стартовой платформы в условиях действия ветра и качки [Текст] / А. В. Дегтярев, А. А. Василенко // Системне проектування та аналіз характеристик аерокосмічної техніки : збірник наукових праць. — Дніпропетровський національний університет імені О. Гончара, 2011. — Т. XI. — С. 16–27.
- [3] **Колесников, К. С.** Жидкостная ракета как объект регулирования. [Текст] / К. С. Колесников — М. : Машиностроение, 1969.
- [4] **Максимаджи, А. И.** Капитану о прочности корпуса судна [Текст] : справочник / А. И. Максимаджи. — Л. : Судостроение, 1988. — 223 с.

© О. В. Дегтярев, І. А. Василенко, А. Є. Кашанов

Надійшла до редколегії 30.01.2012

Статтю рекомендує до друку член редколегії Вісника НУК
д-р техн. наук, проф. *В. О. Нєкрасов*

Статтю розміщено у Віснику НУК №2, 2012