

ВЫБОР УСЛОВИЙ НАГРУЖЕНИЯ РАКЕТЫ КОСМИЧЕСКОГО НАЗНАЧЕНИЯ «ЗЕНИТ-3SL» В СОСТАВЕ КОМПЛЕКСА «МОРСКОЙ СТАРТ»

© 2014 г. Кузнецов В.К., Петров Н.К.

ОАО «Ракетно-космическая корпорация “Энергия” имени С.П. Королёва» (РКК «Энергия»)
Ул. Ленина, 4А, г. Королёв, Московская область, Россия, 141070, e-mail: post@rsce.ru

Рассмотрены вопросы выбора условий нагружения ракеты космического назначения «Зенит-3SL» в составе комплекса «Морской старт» с целью минимизации доработок конструкции ракеты-носителя «Зенит» и разгонного блока типа ДМ. Показаны подход к решению проблем выбора условий нагружения и принятые при этом решения. Большое количество пусков при различных условиях окружающей среды подтвердило правильность выбора условий нагружения ракеты космического назначения «Зенит-3SL».

Ключевые слова: ракета-носитель, разгонный блок, качка, высота волны.

SELECTION OF LOADING CONDITIONS FOR ZENIT-3SL INTEGRATED LAUNCH VEHICLE WITHIN SEA LAUNCH COMPLEX

Kuznetsov V.K., Petrov N.K.

S.P. Korolev Rocket and Space Public Corporation Energia (RSC Energia)
4A Lenin Street, Korolev, Moscow region, 141070, Russia, e-mail: post@rsce.ru

Consideration is given to selection of loading conditions for Zenit-3SL launch vehicle as a part of Sea Launch complex to minimize the Zenit launch vehicle and DM type upper stage structure modifications. The approach to resolve the problems of selecting loading conditions, and taken decisions are shown. A great number of launches under different environment conditions confirmed the right selection of the loading conditions for Zenit-3SL launch vehicle.

Key words: launch vehicle, upper stage, sea motion, wave height.



КУЗНЕЦОВ В.К.



ПЕТРОВ Н.К.

КУЗНЕЦОВ Владимир Кондратьевич — заместитель начальника отдела РКК «Энергия», e-mail: vladimir.kuznetsov@rsce.ru

KUZNETSOV Vladimir Kondratyevich — Deputy Head of Department at RSC Energia

ПЕТРОВ Николай Константинович — д.т.н, заместитель генерального конструктора, руководитель НТЦ РКК «Энергия», e-mail: nikolay.petrov@rsce.ru

PETROV Nikolay Konstantinovich — Doctor of Science (Engineering), Deputy General Designer, Head of STC at RSC Energia

Решение вопросов интеграции всегда является необходимой и первоочередной процедурой, когда в одной сборке объединяются изделия, разработанные и изготовленные разными предприятиями или странами для осуществления общих планов и целей.

Действительно, и разработанная КБ «Южное» (Украина) двухступенчатая ракета-носитель (РН) «Зенит» для старта с космодрома Байконур, и разгонный блок (РБ) типа ДМ, разработанный РКК «Энергия» (Россия) для РН «Протон», и блок полезного груза (БПГ), включающий головной обтекатель для защиты космического аппарата (КА) от внешних воздействий, компании *Boeing Commercial Space Company (BCSC, США)*, и стартовое устройство Конструкторского бюро транспортного машиностроения (КБТМ, Россия), и, наконец, стартовое сооружение — плавающая платформа (бывшая нефтяная, восстановленная после пожара) фирмы *Kværner Moss Technology a.s. (Kværner, Норвегия)* были объединены, в результате, в единый комплекс «Морской старт» [1].

Одним из основных условий обеспечения успешной реализации проекта «Морской старт» было уменьшение объема возможных доработок уже готовых конструкций путем минимизации уровня их нагружения. В первую очередь это относилось к вновь создаваемой ракете космического назначения (РКН) «Зенит-3SL».

Определение и выбор условий нагружения РКН в составе комплекса «Морской старт» были осуществлены в результате совместной работы инженеров и ученых вышеперечисленных компаний и предприятий.

Факторы, влияющие на нагружение конструкции

В качестве общего подхода к решению проблемы определения нагрузок на РКН (включая КА) было принято, что основными факторами, влияющими на нагружение конструкции, являются:

- волнение океана (качка);
- статическая и динамическая составляющие ветрового воздействия;
- негоризонтальность палубы платформы, вызываемая ветром, передвижением по палубе транспортно-установочного агрегата (ТУА), перекачкой компонентов топлива при заправке РКН и др.;
- предстартовые технологические операции;
- старт ракеты.

При проведении расчетов в качестве консервативного решения было принято, что направление движения волн совпадает с направ-

лением действия ветра у поверхности воды. Негоризонтальность платформы, существенно влияющая на нагружение ракеты, должна быть минимизирована с помощью работы системы поддержания крена и дифферента судна. Параметры качки должны определяться только для условий развившегося волнения. При этом качка рассматривается как стационарный случайный процесс относительно статических углов наклона стартовой платформы (СП).

Выбор типа судна для старта РКН

Отдельно на начальном этапе проектирования комплекса стояла проблема выбора типа судна для сборки, транспортирования, проведения предстартовой подготовки и старта РКН. Были рассмотрены два возможных варианта. Первый — использование монокорпусного судна большого водоизмещения для сборки, подготовки и пуска РКН. Второй — использование платформы (на двух понтонах) «Одиссей» в качестве транспортного средства полностью собранной РКН и стартовой площадки. Предварительные расчеты уровня нагружения корневого сечения РКН при стоянке РКН без ТУА в зависимости от значительной высоты волны H_s , курсового угла набегания волн θ (угол между направлением продольной оси судна и направлением движения волн), для интервала времени наблюдения 15 мин, равно предполагаемому интервалу времени между отсоединением ТУА от РКН и моментом старта, для рассматриваемых вариантов судов приведены на рис. 1.

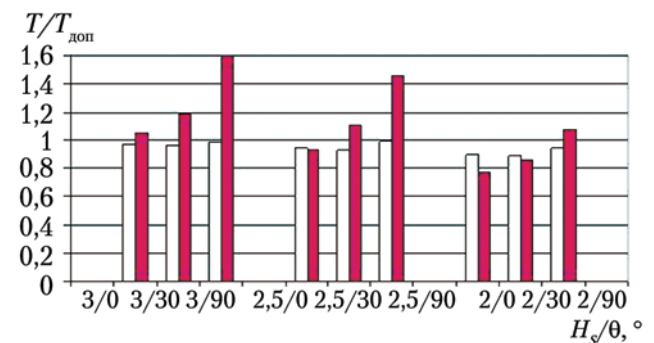


Рис. 1. Уровень нагружения стька ракеты космического назначения с пусковой установкой при старте в зависимости от высоты волны (ожидаемые значения за 15 мин): $T_{доп}$ — допустимое по условиям прочности значение нагрузки; □ — платформа «Одиссей»; ■ — стартовое судно

Расчеты показали, что использование нефтяной платформы в качестве стартовой площадки является предпочтительным. Аналогичные результаты были получены и для РБ ДМ-SL.

Для управления процессами предстартовой подготовки и пуска РКН в автоматическом режиме было предложено создать

и использовать сборочно-командное судно (СКС). При проведении пуска РКН СКС располагается на некотором удалении от СП. СКС также используется для сборки РКН «Зенит-3SL» в Базовом порту. Сборка осуществляется на борту СКС из доставленных в Базовый порт РН «Зенит-2S», РБ ДМ-SL, БПГ и КА. А вот от транспортировки полностью собранной РКН на СКС к месту старта и перегрузки там на СП пришлось отказаться. Такое решение было вызвано сложностями обеспечения перегрузки РКН с СКС на СП в условиях качки и больших взаимных перемещений судов. Необходимо отметить, что в международной практике за характерную высоту волны принята значительная высота H_s , которая определяется как средняя величина трети самых высоких волн. В отечественной практике в качестве характерной высоты волны принимают высоту волн трехпроцентной обеспеченности $H_{3\%}$. При этом $H_{3\%} = 1,32H_s$.

Определение максимальных высот волн и качки СП

Считается, что изменение амплитуды качки судна пропорционально изменению высоты волны, а высота волн и амплитуда качки судна подчиняются закону распределения Релея. В этом случае наиболее вероятная максимальная высота волны H_M в зависимости от числа волн N за время наблюдения в соответствии с [2] определяется выражением

$$H_M = H_s \sqrt{\frac{\ln N}{2}}.$$

Для доверительного уровня вероятности превышения $(1 - \alpha)$, где $\alpha \ll 1$

$$H_M(\alpha) = H_s \sqrt{\frac{\ln(N/\alpha)}{2}}.$$

Максимальная амплитуда качки определяется по аналогичным формулам.

Расчет качки судов проводится с использованием спектральных методов теории стационарных случайных процессов. При этом, как интегральное значение, определяется среднеквадратическое отклонение σ . Значительная амплитуда качки α_s в этом случае определяется, как $\alpha_s = 2\sigma$ (аналогично определяется значительная высота волны H_s). Тогда выражение для максимальной ожидаемой амплитуды качки α_M записывается в виде

$$\alpha_M(\alpha) = \sigma \sqrt{2 \ln(N/\alpha)} = \sigma M_f;$$

$$M_f = \sqrt{2 \ln(N/\alpha)}.$$

Значение коэффициента M_f зависит от числа циклов колебаний за время наблюдения и доверительного уровня вероятности превышения максимального значения. Предложенные компанией *Kvaerner* значения интервалов времени наблюдения t и доверительного уровня $(1 - \alpha)$, а также соответствующие им значения M_f для различных этапов эксплуатации СП с РКН, приведены в таблице. Эти значения M_f приняты для всех углов θ набегающих волн.

Значение коэффициента M_f в зависимости от времени наблюдения и доверительного уровня вероятности превышения максимального значения

Этап эксплуатации	$(1 - \alpha)$, %	t , мин	M_f
Транспортировка РКН к месту старта	90	90	4,15
Хранение РКН в ангаре СП в месте старта	90	90	4,15
Перед подъемом РКН в вертикальное положение	90	90	4,15
РКН вертикальна с ТУА	90	90	4,15
РКН вертикальна без ТУА	99	15	4,27
Старт РКН *	99,99	0,166 (10 с)	4,27

Примечание. * – в случае использования удлиненного блока полезного груза (длиной 15,975 м) для угла $\theta = 90^\circ$ коэффициент M_f принят равным 3,03; РКН – ракета космического назначения; ТУА – транспортно-установочный агрегат; СП – стартовая платформа.

На основании этих данных компанией *Kvaerner* были определены максимальные амплитуды качки СП.

Условия нагружения РКН при транспортировании к месту старта

Базовый порт, где собирается РКН, расположен вблизи Лос-Анджелеса, а место старта – на экваторе. Поэтому при определении условий нагружения РКН в процессе транспортирования на СП к месту старта (параметров качки СП) было учтено, что возможен шторм со значительной высотой волны $H_s = 6,5$ м, и действует постоянная качка судна. На основании статистических данных, представленных в виде двумерной плотности распределения числа волн для Тихого океана в зависимости от значительной высоты и пикового периода волн, были определены ожидаемые максимальные значения амплитуд качки судна и соответствующее им число циклов. Эти данные были необходимы для обеспечения усталостной прочности конструкции РКН. При этом общий интервал времени наблюдения был равен 37 дням и назначен с учетом возможного возврата СП в Базовый порт, необходи-

мого ремонта и повторного возврата к месту старта. При большом развитом волнении СП должна двигаться. В случае остановки уровень качки возрастает. Для снижения уровня нагружения РКН на СП во время морской транспортировки было принято, что в случае, если значительная высота волн начнет превосходить значение $H_s = 6,5$ м, то СП необходимо перейти в полупогруженное положение (как при старте РКН). При этом значительно (не менее, чем в два раза) снижаются внешние силы, действующие на СП, и уменьшается уровень качки.

В месте старта, при хранении РКН в ангаре на СП, проведении предстартовой подготовки и старте РКН, СП находится в полупогруженном состоянии с целью уменьшения качки и нагружения РКН.

Условия нагружения при предстартовой подготовке и старте РКН

В процессе проведения предстартовой подготовки РКН, когда РКН находится в вертикальном положении, максимальные нагрузки в сечениях корпуса РКН реализуются в корневом сечении. Естественно, РКН «Зенит» была спроектирована на нагрузки, которые учитывали нагружение конструкции РКН только от действия приземного ветра. Однако в условиях предстартовой подготовки РКН на СП помимо ветра действует еще и качка. Поэтому допустимая скорость приземного ветра для РКН «Зенит-3SL» должна быть снижена по сравнению с той, на которую была рассчитана прочность РН «Зенит». В качестве компромиссного решения было принято, что средняя скорость ветра V на высоте 10 м от поверхности воды $V(10)$ в месте старта должна соответствовать вероятности непревышения 0,9. По данным компании BCSC, для района Тихого океана вблизи места старта это значение соответствовало 10 м/с. Зависимость изменения средней скорости ветра V от высоты h была принята в следующем виде:

$$V(h) = V(10) \left(\frac{h}{10}\right)^K.$$

Значение K принято равным 0,1, как для относительно ровной поверхности. Динамическую составляющую скорости ветра предложено учитывать путем умножения $V(h)$ на 1,4.

Для контроля параметров волн, скорости и направления ветра вблизи места старта был установлен буй № 51028. Полученные с него статистические данные по значениям скорости ветра (пересчитанные для $h = 10$ м) за период наблюдения с октября 1997 г. по август

2002 г. были обработаны специалистами компании BCSC и представлены в зависимости от месяца года на рис. 2.

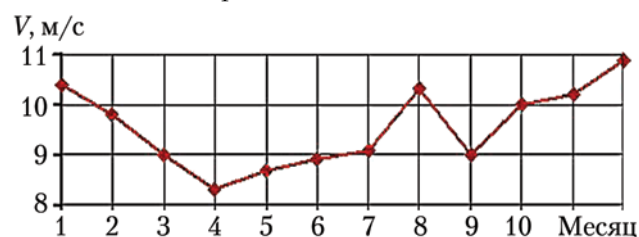


Рис. 2. Значение скорости ветра вблизи места старта в зависимости от месяца года

Приведенные данные соответствуют вероятности непревышения 0,9 с доверительной вероятностью 0,95. При проведении дальнейших исследований нагружения конструкции в процессе предстартовой подготовки и старта РКН значение средней скорости ветра было уточнено в зависимости от высоты и направления движения волн относительно судна с учетом несущей способности конструкции РКН.

Анализ нагружения несущей конструкции РН «Зенит-2S», РБ ДМ-SL и БПГ с КА показал, что наибольший вклад в динамическое нагружение конструкции в поперечном направлении при проведении предстартовой подготовки и старте РКН вносит качка. При этом максимальное нагружение хвостовой части конструкции РН реализуется непосредственно перед стартом, когда нет связи РКН с ТУА. Максимальное же нагружение РБ ДМ-SL, БПГ и КА реализуется в процессе старта и на начальном участке полета РКН (в первые секунды после отрыва РКН от СП). Это связано с тем, что в процессе предстартовой подготовки нагружение носит практически квазистатический характер (период бортовой качки СП примерно 9,5 с, килевой — 17,5 с), а при старте РКН вследствие изменения граничных условий и практически мгновенного снятия изгибающего момента в корневом сечении РКН реализуется интенсивное динамическое нагружение. Наиболее нагруженными частями конструкции РБ ДМ-SL при этом являются подвесные баки окислителя и горючего, а в БПГ — КА, установленный консольно.

Анализ действующих ускорений также показал, что при качке значения продольных (вдоль продольной оси РКН) ускорений меняются незначительно в зависимости от направления движения волн относительно продольной оси СП, а значения поперечных ускорений существенно зависят от направления движения волн. При этом основной вклад в нагружение конструкции вносят поперечные ускорения. Таким образом, было установлено, что величина допустимого угла между направлением СП и направлением движения волн (курсовой угол) должна быть

найдена в зависимости от величины допустимых поперечных нагрузок, на которые разработана конструкция. В результате проведенных оценок нагружения РКН было получено, что при старте РКН уровень динамического нагружения РБ ДМ-SL и БПГ, практически, прямо пропорционален величине изгибающего момента в корневом сечении РКН, установленной на стартовый стол и не поддерживаемой ТУА. При этом в случае старта в условиях, когда перед стартом в корневом сечении РКН реализуются максимально допустимые нагрузки, уровень нагружения блока ДМ-SL и БПГ не превышает допустимых значений.

Дальнейшие расчеты показали, что пуск РКН может производиться, если значительная высота волн не превышает 2,5 м, средняя скорость ветра не выше 10 м/с и курсовой угол набегания волн находится в границах $\pm 45^\circ$ относительно продольной оси СП или 1,5 м и 8 м/с соответственно для углов набегания волн в любом другом направлении (рис. 3).

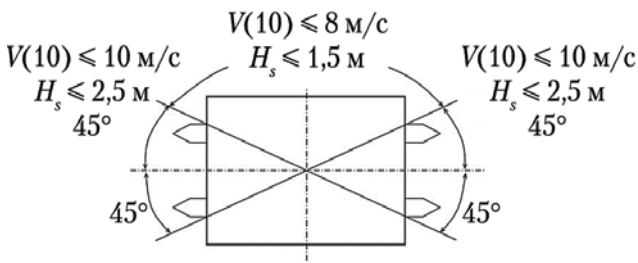


Рис. 3. Зависимость допустимых значений средней скорости ветра $V(10)$ и значительной высоты волны H_s от угла набегания волн на стартовую платформу

Именно эти значения были приняты, как проектные, для разработки конструкции РН «Зенит-2S», РБ ДМ-SL и БПГ, а также при интеграции КА для запуска на РКН «Зенит-3SL». Результаты этих расчетов на примере зависимости уровня динамического нагружения бака окислителя РБ ДМ-SL при старте РКН от направления действия θ , высоты волн H_s и скорости ветра приведены на рис. 4.

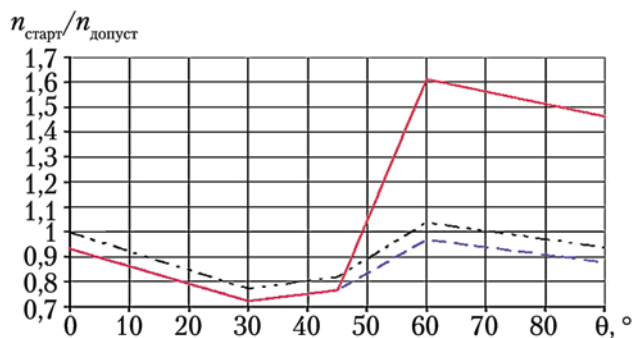


Рис. 4. Изменение отношения $n_{\text{старт}}/n_{\text{допуст}}$ в зависимости от направления действия волн на стартовую платформу: — РБ с № 1Л по № 16Л; для всех θ ; $H_s = 2,5$ м; — РБ с № 1Л по № 16Л; $H_s = 2,5$ м; $0 < \theta \leq 45^\circ$; $H_s = 1,5$ м; $45 < \theta \leq 90^\circ$; — РБ с № 18Л; $H_s = 2,5$ м; $0 < \theta \leq 45^\circ$; $H_s = 1,5$ м; $45 < \theta \leq 90^\circ$

На рис. 4 по оси ординат приведено отношение поперечной перегрузки при старте РКН ($n_{\text{старт}}$) к допустимому значению ($n_{\text{допуст}}$). Топливные баки РБ ДМ-SL с № 1Л по № 16Л имеют обычные размеры, а с № 18Л — увеличенные. При проведении анализа нагружения РБ ДМ-SL при старте РКН был также получен важный результат, показывающий, что если перед стартом РКН значение прогнозируемой нагрузки в корневом сечении РКН не превысит допустимых значений, то нагружение РБ ДМ-SL в процессе старта также не будет превышать допустимых значений. Значение прогнозируемой нагрузки перед стартом РКН определяется специалистами КБ «Южное» по результатам фактических измерений параметров качки судна для фактического положения СП относительно движения волн и фактических данных по значениям приземного ветра.

Поскольку поперечное динамическое нагружение КА и топливных баков РБ ДМ-SL при старте РКН максимально, основное внимание в процессе тестовых испытаний СП было уделено уменьшению параметров факторов, влияющих на величину изгибающего момента в корневом сечении РКН. В частности, исследовался вопрос влияния упругости конструкции СП на показания датчиков, регистрирующих процесс качки СП. Результаты непосредственных измерений показали, что показания датчиков, регистрирующих качку СП и расположенных в носовой и корневой частях СП, совпадают. Однако, чтобы избежать возможных ошибок, было принято решение юстировать датчики по отношению к стартовому столу. При этом ожидаемая ошибка должна быть не более $0,1^\circ$.

Учитывая, что перемещение любых масс относительно центра масс СП приведет к угловым перемещениям СП, было принято решение о введении таких предварительных наклонов СП при проведении операций, чтобы после проведения операции стартовый стол и палуба СП были горизонтальны. Так, перед вывозом ТУА с РКН из ангара дается преднаклон по дифференту $+0,5^\circ$ и проводится контроль, чтобы после вывоза РКН дифферент СП был равен нулю. Такой контроль проводится после окончания каждой операции, если перед ее началом был сделан преднаклон. Перед опусканием стрелы ТУА и возвращением ТУА в ангар дается предварительный дифферент $-0,2^\circ$. Дифферент СП на момент старта РКН должен быть равен нулю.

В процессе определения условий эксплуатации РКН на СП рассматривались и вопросы возможности использования БПГ различных компоновочных схем. В частности, исполь-

зование БПГ длиной 15,975 м. Проведенные расчеты (РКК «Энергия» и КБ «Южное») показали, что при использовании БПГ такой длины для РКН в горизонтальном положении в условиях качки необходимо введение дополнительной опоры под БПГ. Такое решение требовало конкретной проработки конструкции дополнительной опоры, а использование БПГ длиной 15,975 м не было актуальным на той стадии разработки проекта и поэтому в дальнейшем не рассматривалось. Одним из возможных направлений снижения нагрузок на РБ ДМ-SL при старте РКН была попытка проработки возможности пуска РКН в тот момент времени, когда текущие углы качки судна приблизительно равны нулю. Однако эта идея не была принята из-за сложности разработки и реализации алгоритмов системы управления пуском.

Обеспечение безопасности стартовой платформы при старте РКН

Для обеспечения безопасности СП при старте РКН из-за возникновения возможных аварийных ситуаций после отрыва РКН от СП было принято решение о введении маневра увода РКН от СП. Однако на пути реализации этого решения встал вопрос о допустимых границах на поверхности СП, за которые не должны заходить следы струй двигателей РКН. Наличие таких границ связано с тем, что в помещениях СП, расположенных вблизи стартового стола, находятся приборы и оборудование систем управления пуском РКН и обеспечения проведения предстартовых операций. Почти все они были заимствованы из систем, которые ранее создавались и эксплуатировались в подземных стартовых сооружениях. А на СП защитой от акустического и пульсационного воздействия на поверхность СП являлась только усиленная обшивка палубы. Поэтому для снижения уровня акустического шума и вибрации внутри помещений СП при старте РКН необходимо, чтобы до достижения определенной высоты полета РКН следы струй не выходили за определенные границы. В результате совместной работы специалистов РКК «Энергия» и КБ «Южное» такие границы были определены, и все вопросы, связанные с реализацией маневра увода РКН, решены.

Условия нагружения РКН в полете

После определения условий нагружения конструкции РКН в составе СП необходимо было определить условия нагружения РКН в

полете. Решение этого вопроса связано с возможностями системы управления (СУ) РН «Зенит-2S», на которую устанавливается разгонный блок ДМ-SL (большой массы), а на РБ ДМ-SL сверху устанавливается БПГ с диаметром обтекателя большим, чем тот, на который были разработаны конструкции РН и РБ. При этом необходимо было минимизировать внешние нагрузки, чтобы обеспечить минимальные доработки конструкции. В процессе полета РКН, особенно в зоне максимального скоростного напора ($\max q$), особое внимание уделяется определению поперечных аэродинамических сил, обычно определяющих прочность конструкции корпусов верхней части РН, РБ и БПГ. Значение распределенной поперечной аэродинамической силы Y (для симметричных РН) определяется по формуле

$$Y = C_y^\alpha \alpha_n q S,$$

где C_y^α — производная по углу атаки коэффициента распределенной поперечной аэродинамической силы; α_n — пространственный угол атаки; q — скоростной напор; S — характерная площадь.

В зоне максимального скоростного напора значение C_y^α меняется незначительно. Поэтому для ограничения поперечных аэродинамических сил, действующих на РКН, вводится ограничение на значение произведения скоростного напора на пространственный угол атаки α_n . Выполнение этого ограничения обеспечивается работой СУ РН. Учитывается действие струйных течений ветра. Действие порыва ветра (при введении ограничения на произведение $\alpha_n q$) не учитывается, так как предполагается, что СУ не реагирует на порыв. Действие порыва ветра учитывается при проведении связанного расчета нагрузок на РКН.

Основной целью в определении условий нагружения РКН в полете была задача определения минимально возможного и обеспечиваемого СУ РН значения произведения скоростного напора на пространственный угол атаки в процессе движения по возмущенной траектории. Дело в том, что взятая за прототип РН «Зенит» была спроектирована фактически как всепогодная, и для нее практически не было ограничений на значения скорости ветра по траектории полета. Для новой компоновочной схемы РКН «Зенит-3SL» эти ограничения нужно было определить. В результате интенсивной проработки этого вопроса разработчик СУ РН восстановил в ней алгоритмы ограничения аэродинамических нагрузок на РКН, подобные тем, которые были реализованы в системе управления РКН «Энергия». По результатам проведенного моделирования работы

СУ было принято решение об ограничении СУ РН максимального значения произведения пространственного угла атаки α_n на скоростной напор q (с учетом струйных течений ветра и без учета порыва ветра) на участке работы контура ограничения нагрузок до $\alpha_n q \leq 13\,500 \text{ кгс} \times \text{°}/\text{м}^2$. При этом, по предложению компании *BCSC*, одновременно было принято неординарное решение о проведении расчета нагрузок на БПГ, РБ ДМ-*SL* и РН «Зенит-2*S*» в процессе полета РКН в зоне максимального скоростного напора для $\alpha_n q \leq 15\,000 \text{ кгс} \times \text{°}/\text{м}^2$. Такое предложение было вызвано тем, что коэффициенты аэродинамических сил при проведении расчетов нагрузок были приняты равными их номинальным (средним) значениям, и задана точность их определения. По вопросу учета в нагрузках точности определения коэффициентов аэродинамических сил были разные мнения у компании *BCSC* с РКК «Энергия» и КБ «Южное». Поэтому и пришли к компромиссному решению — увеличению $\alpha_n q$ для расчета нагрузок, чтобы не нарушать нормативные документы по проектированию конструкций, принятые в разных странах. Значения скорости струйных течений ветра в зоне старта для расчета нагрузок в зависимости от высоты полета РКН были определены компанией *BCSC* с вероятностью не превышения 0,95, а сдвиги скорости ветра — с вероятностью 0,99. Так как СУ РН должна быть спроектирована с более высокой вероятностью не превышения, то при ее проектировании и проведении моделирования вводятся соответствующие поправки. Предельное значение $\alpha_n q \leq 13\,500 \text{ кгс} \times \text{°}/\text{м}^2$ обеспечивается работой СУ от воздействия ветра с учетом этих поправок. Скорость порыва ветра на начальном этапе расчетов проектных нагрузок была принята равной 7,6 м/с. В дальнейшем, после тщательной обработки (компанией *BCSC*) результатов измерений параметров атмосферы в зоне пуска, эта величина была снижена до 3,8 м/с. Нужно отметить, что в результате того, что контур ограничения аэродинамических нагрузок работает в определенном диапазоне чисел Маха, до его включения и после выключения значения углов атаки ничем не ограничиваются. Таких участков, когда возможна реализация повышенных значений произведения $\alpha_n q$ при относительно небольших скоростных напорах, два. Один участок, в районе ~30 с полета РКН, когда осуществляется маневр разворота ракеты и контур еще не включен, и второй участок, ~100 с полета, когда контур ограничения нагрузок уже выключен. Ракета после парирования возмущений на предыдущем участке полета летит с отклонениями от траектории

выведения и переходит на терминальное управление. Переход на терминальное управление вызывает разворот ракеты за короткое время и появление больших пространственных углов атаки. Разворот нужен для обеспечения необходимых условий разделения первой и второй ступеней и падения отделяющихся частей в заданный район океана.

Типичные проектные данные ожидаемого изменения $\alpha_n q$ по времени полета РКН, предназначенные для проведения расчетов связанных нагрузок при интеграции КА, приведены на рис. 5.

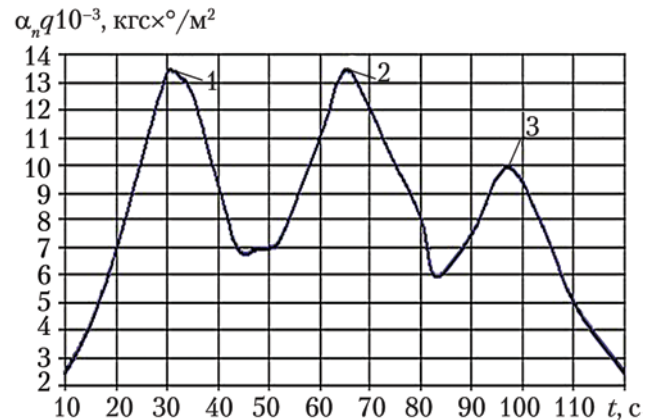


Рис. 5. Типичные проектные данные изменения параметра $\alpha_n q$ от времени полета: 1 — $M \approx 0,6$; 2 — $\max q$, $M \approx 2,0$; 3 — $M > 4,0$

Снижение пространственных углов атаки, и, соответственно, уровня нагружения РКН в районах ~30 и 100 с полета возможно только за счет введения ограничений на значения скоростей струйных течений ветра и угловых скоростей разворота РКН.

Нагружение конструкции несущего корпуса РБ ДМ-*SL* максимально при движении РКН в зоне максимального скоростного напора. Поэтому, учитывая, что в дальнейшем возможно применение в составе РКН «Зенит-3*SL*» БПГ длиной 15,975 м, РКК «Энергия» на начальном этапе разработки проекта приняла превентивное решение о разработке несущего корпуса РБ с учетом этой возможности (чтобы избежать в дальнейшем отработки прочности РБ на увеличенные нагрузки). Принятие в дальнейшем компанией *Sea Launch* решений по улучшению характеристик комплекса «Морской старт» в процессе его эксплуатации — увеличению максимального значения скоростного напора, массы КА, объема топливных баков РБ ДМ-*SL* по сравнению с заложенными при проектировании — не привело к доработкам несущего корпуса РБ ДМ-*SL*.

Совместная разработка компаниями условий нагружения РКН связана с тем, что РКК «Энергия», КБ «Южное» и *BCSC* проводят

самостоятельно расчеты нагружения конструкций собственной разработки и затем обмениваются результатами расчетов. Совпадение результатов расчетов подтверждает разработчику КА правильность расчета нагрузок. Особым вопросом был обмен данными по математическим моделям конструкций. В результате компания *Kvaerner* представила амплитудно- и фазочастотные характеристики СП при старте РКН, КБ «Южное» – динамическую модель первых двух ступеней РН «Зенит-2S», РКК «Энергия» – динамическую модель РБ ДМ-*SL*, *BCSC* – БПГ с КА, КБТМ – динамическую модель стартового устройства. Случай единственный и беспрецедентный – три организации в разных странах могут независимо определить все нагрузки на все составные части РКН.

Все условия эксплуатации для РБ ДМ-*SL* и РН «Зенит-2S» были также определены для случаев их автономной эксплуатации, в т. ч., при транспортировании на СКС или на судне «Кондок» класса РО-РО. Казалось, рассмотрели все возможные случаи нагружения, включая действие вибрации. Однако, жизнь оказалась богаче на выдумки. Разгонный блок ДМ-*SL* транспортировался на судне «Кондок» из порта на Черном море в Базовый порт. Транспортирование блока производилось в специальном контейнере, установленном на опоры. Для контроля виброперегрузок, возникающих в процессе транспортирования, рядом с одной из опор были установлены вибродатчики. После прибытия в Базовый порт показания датчиков были проанализированы и оказалось, что в процессе транспортирования периодически регистрируются ударные воздействия с амплитудой до 1 000 g, что недопустимо. По сообщению сопровождающего блок, произошло следующее: прибывший на борт судна представитель страховой компа-

нии заявил, что опоры контейнера выглядят довольно слабыми и предложил команде для страховки подкрепить контейнер от возможного падения. Команда нашла шпалы и уложила их под контейнер, закрепив клиньями. В процессе транспортирования при качке клинья ослабевали и шпалы начинали расползаться. Чтобы этого не происходило, команда кувалдой забивала клинья, что и было причиной несанкционированных ударных воздействий. РКК «Энергия» со своей стороны подтвердила достаточную прочность опор контейнера и предложила компании *Sea Launch*, если будет требование страховой компании, изменить способ страховки контейнера.

Заключение

Показаны подход к решению проблем выбора условий нагружения РКН в составе комплекса «Морской старт» и принятые решения для обеспечения минимальных доработок составных частей РКН (РБ и РН). Определены основные факторы, влияющие на уровень нагружения ракеты космического назначения. Дальнейшая эксплуатация комплекса «Морской старт» показала правильность и достаточность выбранных для проектирования и интеграции космических аппаратов условий нагружения РКН.

Список литературы

1. Алиев В.Г., Легостаев В.П., Лонота В.А. Создание и пятнадцатилетний опыт эксплуатации ракетно-космической системы «Морской старт» // Космическая техника и технологии. 2014. № 2 (5). С. 3–13.
2. Максимаджи А.И. Капитану о прочности судна: Справочник. Л.: Судостроение, 1988. Статья поступила в редакцию 08.04.2014 г.