

Анализ динамических режимов работы системы вертикализации универсального стартового комплекса для перспективной ракеты космического назначения сверхтяжелого класса

© В.Г. Зотов¹, А.О. Никитин¹, А.В. Языков²

¹ Филиал АО «ЦЭНКИ» — Научно-исследовательский институт стартовых комплексов имени В.П. Бармина, Москва, 119526, Россия

² МГТУ им. Н. Э. Баумана, Москва, 105005, Россия

Представлены результаты анализа динамических процессов, протекающих на различных этапах работы установочного агрегата космического ракетного комплекса сверхтяжелого класса для одного из вариантов комплектации ракеты космического назначения «Енисей», предназначенной как для реализации лунной программы, так и для освоения дальнего космоса. Вертикализация и установка рассматриваемой ракеты космического назначения на пусковой стол осуществляются подъемно-установочным агрегатом оригинальной конструкции. Основной особенностью данного агрегата является наличие двух осей кантования. Установочный агрегат рассмотренного типа ранее не применяли в отечественных ракетных комплексах. Несмотря на некоторое сходство такого агрегата с классическим установщиком с подъемной рамой, в процессе его функционирования возникают специфичные режимы работы с повышенным динамическим нагружением конструкции агрегата и поднимаемого изделия. Проведенные расчеты позволили предложить конструктивные решения, обеспечивающие снижение динамических нагрузок на ракету космического назначения в процессе операций вертикализации и установки на пусковой стол.

Ключевые слова: стартовый комплекс, ракета-носитель, ракета космического назначения, установщик

Введение. В настоящее время ведется разработка космического ракетного комплекса сверхтяжелого класса (СТК), имеющего в своем составе ракету космического назначения (РКН), позволяющую выводить на низкую опорную орбиту полезный груз массой свыше 100 т. В открытых источниках данной РКН присвоено имя «Енисей». На текущий момент работы вышли на стадию технического проекта [1]. Для нового сверхтяжелого носителя проводятся проработки вариантов средств доставки на космодром [2], сборки в монтажно-испытательном корпусе и транспортировки к месту старта [3, 4], установки на стартовый стол [5] и предстартового обслуживания [6].

Цель настоящей работы — исследовать динамические процессы, протекающие при вертикализации и установке на пусковой стол (ПС) РКН СТК с использованием подъемно-установочного агрегата (ПУА) нового типа и сформулировать инженерные задачи, решить которые необходимо при технической реализации такого агрегата.

В работе рассмотрен один из вариантов комплектации РКН «Енисей», предназначенный как для реализации лунной программы, так и для освоения дальнего космоса.

Трехступенчатая ракета-носитель (РН) космического назначения «Енисей» (рис. 1) собрана на базе пакета из шести кислородно-керосиновых блоков с жидкостными ракетными двигателями (ЖРД) РД-171МВ (четыре боковых блока (ББ) — первая ступень, два ББ — вторая ступень). Кроме того, в состав РН входят центральный кислородно-керосиновый блок (ЦБ) третьей ступени с ЖРД РД-180МВ, кислородно-водородный разгонный блок РКН СТК (РБ РКН СТК), кислородно-керосиновый межорбитальный буксир (МБ) и космическая головная часть (КГЧ) с пилотируемым транспортным кораблем (ПТК) или автоматическим космическим аппаратом.

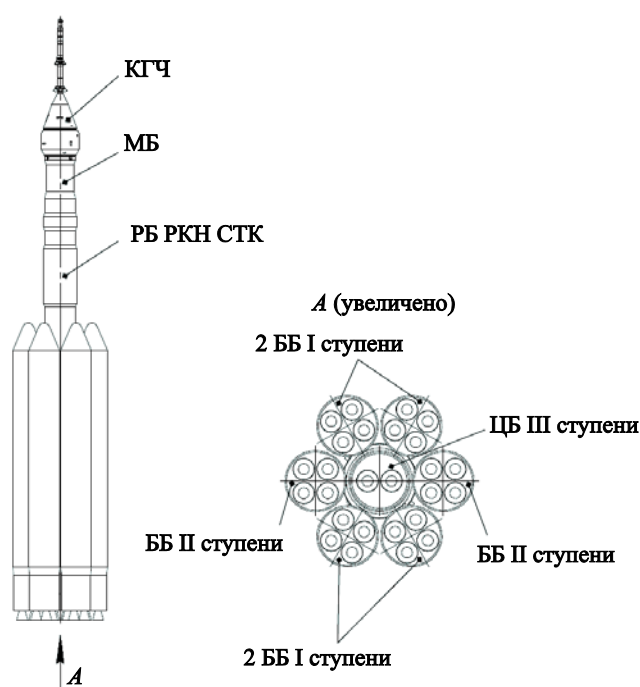


Рис. 1. Общий вид рассматриваемого варианта РКН «Енисей»

Описание исследуемого агрегата. Вертикализацию и установку РКН на ПС предполагается осуществлять ПУА оригинальной конструкции (рис. 2). Основной особенностью данного агрегата является наличие двух осей кантования: оси ПУА и оси шарнирного соединения стартово-стыковочного блока (ССБ) и транспортно-установочной тележки (ТУТ) с ПС («ССБ-ТУТ-ПС»). Необходимость введения оси кантования «ССБ-ТУТ-ПС» обусловлена оптимальным распределением нагрузок в процессе вертикализации РКН по сравнению с классическим вариантом с одной осью. Для того чтобы обеспечить

совместный поворот системы с двумя осями кантования в конструкции стрелы ПУА, предусмотрен роликовый ползун с рельсовыми направляющими (рис. 3).

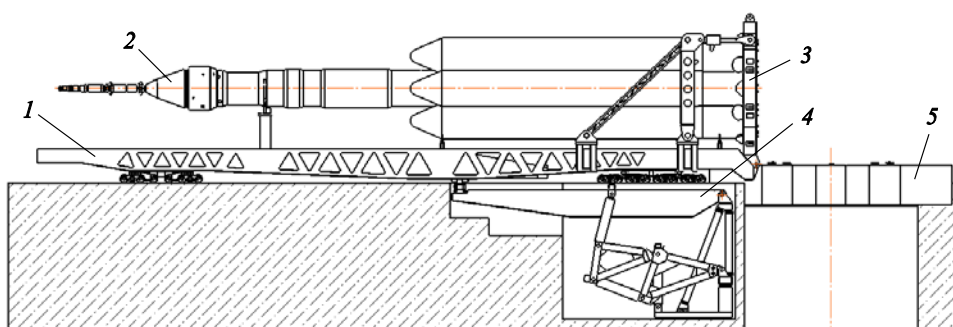


Рис. 2. Общий вид системы вертикализации РКН «Енисей»: 1 — ТУТ; 2 — РКН; 3 — ССБ; 4 — ПУА; 5 — ПС

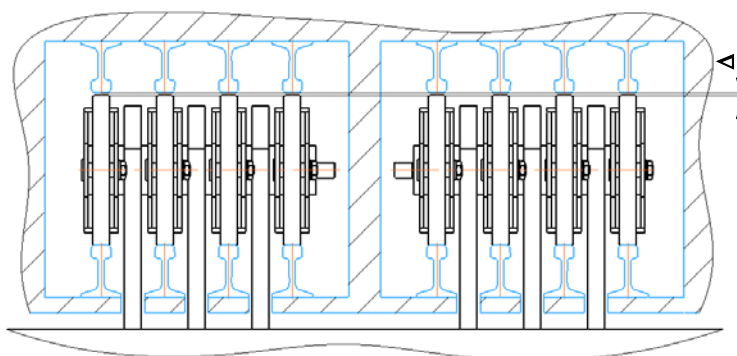


Рис. 3. Общий вид роликового ползуна — узла сопряжения ТУТ с ПУА

Установочный агрегат с использованием двух осей кантования ранее не применялся в отечественных ракетных комплексах. Поскольку часть нагрузки от вертикализуемого изделия передается на стрелу ПУА, функционирование такого агрегата в целом аналогично работе установщика с подъемной рамой, в котором основные динамические нагрузки возникают в момент начала движения, при переключении ступеней гидроцилиндров или ярусов подъема и в момент остановки. Однако предусмотрены и специфичные для агрегатов этого вида режимы с высоким динамическим нагружением, обусловленным ветровыми нагрузками и особенностями передачи веса на конструкцию.

Первый специфичный режим «Переброс веса» реализуется при подъеме стрелы в момент перехода, вызванного перемещением центра масс системы ТУТ — РКН — ССБ за ось поворота ТУТ, в результате чего возникают одномоментное изменение знака опрокидывающего момента и, как следствие, удар в узле стыковки вследствие

свободной выборки зазора между колесами тележки и опорными рельсами.

Вторым специфичным режимом является режим «Передачи веса», связанный с выдвиганием опор стартового стола. Такой способ передачи веса редко применялся в отечественной практике, в основном на комплексах РН легкого класса, а также в пусковой установке РН сверхтяжелого класса «Н1» [7, 8].

Методы проведения исследования. Анализ динамических процессов для выбранных случаев выполнялся в программном комплексе SADAS, разработанном на кафедре «Стартовые ракетные комплексы» МГТУ им. Н.Э. Баумана [9, 10].

Принятая расчетная модель конструкции представляет собой построенную по методу суперэлементов систему, отдельные элементы которой представляют собой стержневые конечно-элементные модели. Суперэлементы расположены в положениях, соответствующих положениям агрегатов, которые участвуют в установке РКН для выбранных расчетных случаев и соединены между собой жесткими, шарнирными и нелинейными связями, моделирующими соединения элементов агрегатов. Положение модели в пространстве характеризуется декартовыми координатами узлов в глобальной системе координат XYZ (рис. 4, 5).

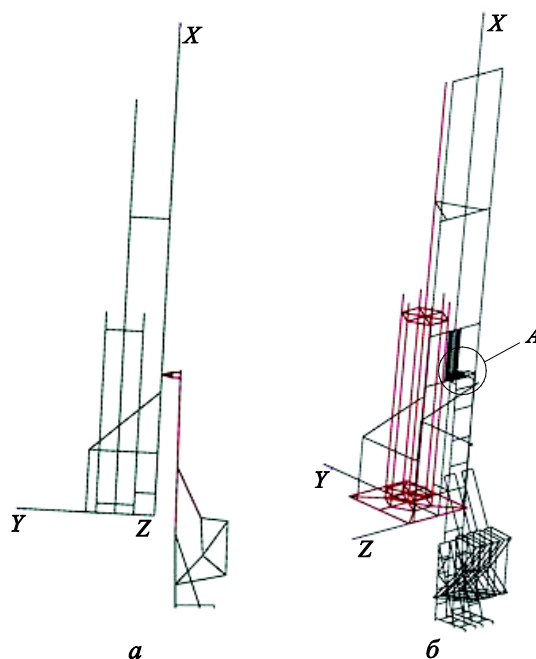


Рис. 4 (начало). Ориентация элементов расчетной модели для случая «Переброс веса»:

a — вид сбоку; *б* — аксонометрическая проекция

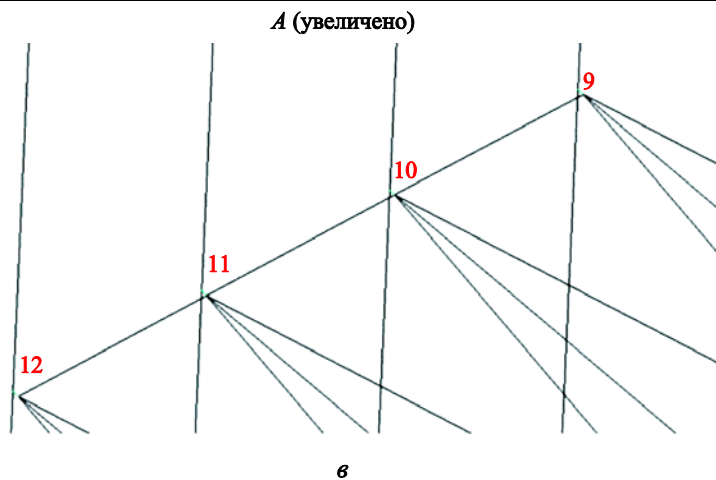


Рис. 4 (окончание). Ориентация элементов расчетной модели для случая «Переброс веса»:

в — места наложения связей между ТУТ и ПУА

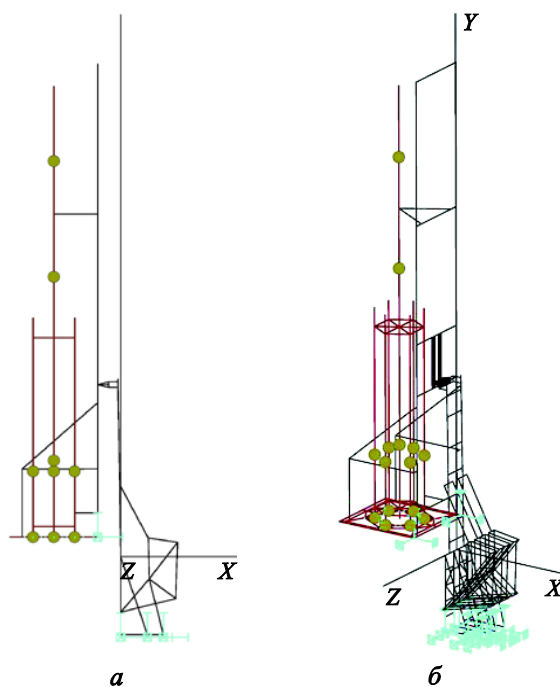


Рис. 5. Ориентация элементов расчетной модели для случая «Передача веса»:

а — вид сбоку; б — аксонометрическая проекция

В местах, соответствующих узлам крепления агрегатов системы вертикализации в модели, заданы элементы, обеспечивающие необходимые степени свободы: ползуны, цилиндрические и сферические шарниры.

Узел стыковки ТУТ с ПУА моделируется системой 24 нелинейных связей (по три связи, работающие вдоль каждой из декартовых осей в местах передачи усилий подвижной тележки узла крепления ТУТ на стрелу ПУА). Номера нелинейных связей в узле сопряжения ТУТ с ПУА обозначены на рис. 4. Графики заданных жесткостных и демпфирующих характеристик нелинейных связей показаны на рис. 6, 7. Жесткостная характеристика нелинейной связи вдоль оси Y имеет горизонтальный участок, моделирующий технологический зазор узла связи ТУТ и ПУА. Масштабные коэффициенты графиков подбирались в процессе расчета исходя из условий минимизации перемещений и ускорений в контрольных узлах конструкции при динамических нагрузках для процесса «переброса» и передачи веса.

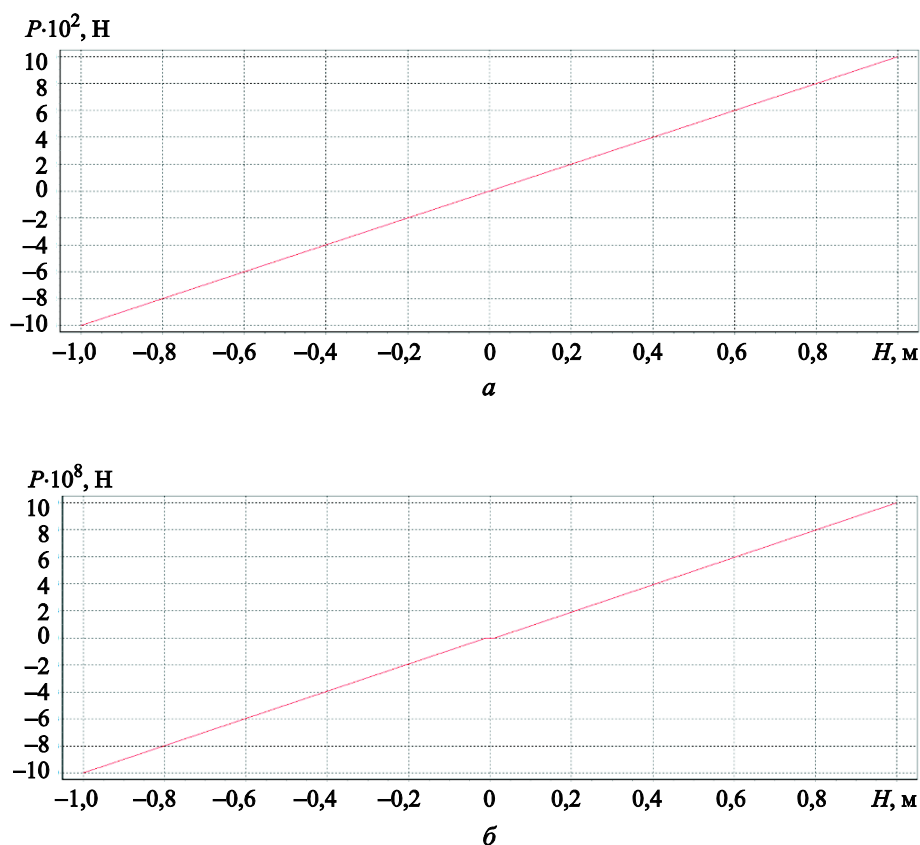


Рис. 6. Зависимость усилия P в нелинейных связях от перемещения H вдоль осей X, Z (а) и вдоль оси Y (б)

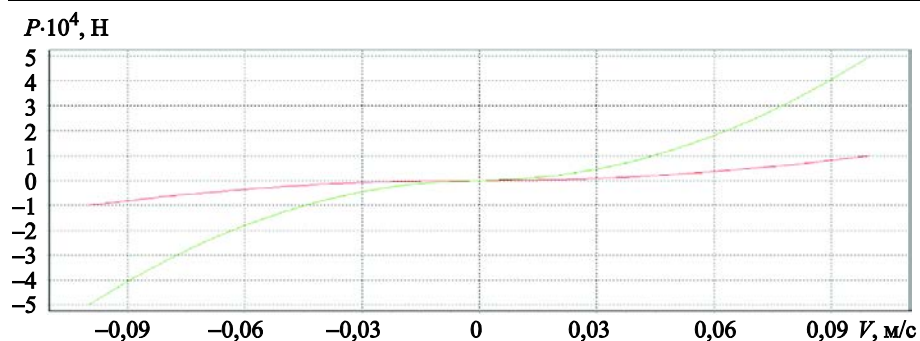


Рис. 7. Зависимости усилия P в нелинейных связях от скорости удлиннения V для связей, работающих вдоль осей OX и OZ (—) и OY (—)

В модель для расчетного случая «Передача веса» также введены нелинейные связи, моделирующие односторонний контакт в опорных элементах ПС. На рис. 8 цифрами обозначены места наложения связей между ПС и стартово-стыковочным блоком РКН.

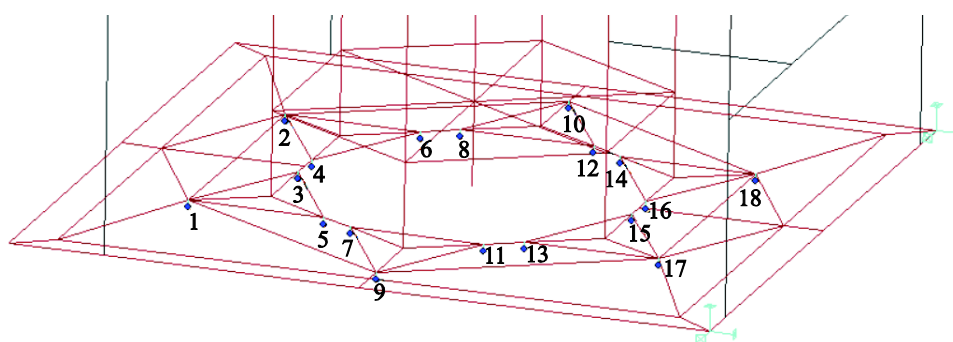


Рис. 8. Места наложения связей (1–18) между ПС и стартово-стыковочным блоком РКН

Упругие и демпфирующие характеристики нелинейных связей в опорах (см. рис. 8) показаны на рис. 9, 10. Графики упругих характеристик имеют излом, моделирующий работу пружинных элементов в местах, где опираются ССБ, предназначенные для сглаживания неравномерности в усилиях при подъеме опор. Демпфирующая характеристика нелинейных связей между ПС и изделием срабатывает после касания опор изделия. Для этого используется дополнительный график изменения масштабного коэффициента демпфирования (рис. 11).

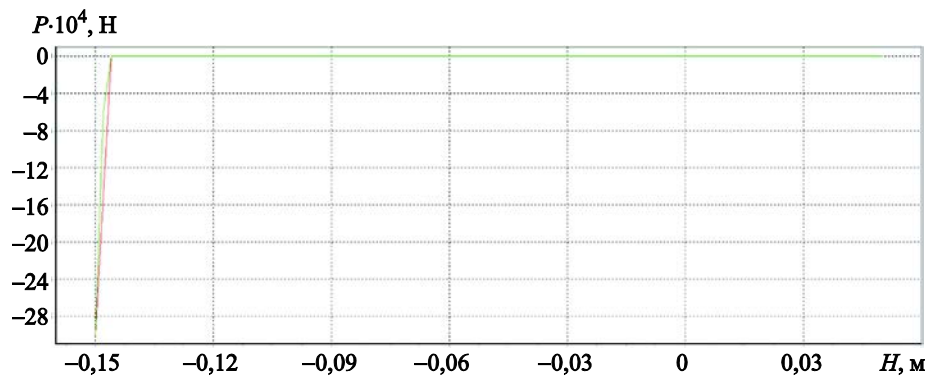


Рис. 9. Зависимости усилия P в нелинейных связях от удлинения H опор 1–16 (—) и опор 17–18 (—)

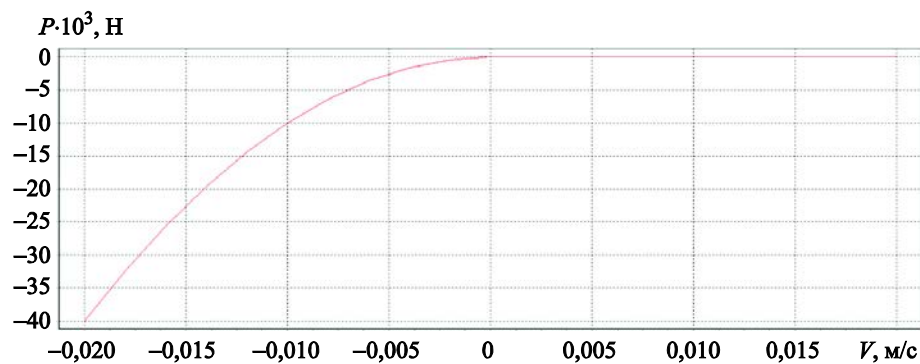


Рис. 10. Зависимость усилия P в нелинейных связях от скорости удлинения V

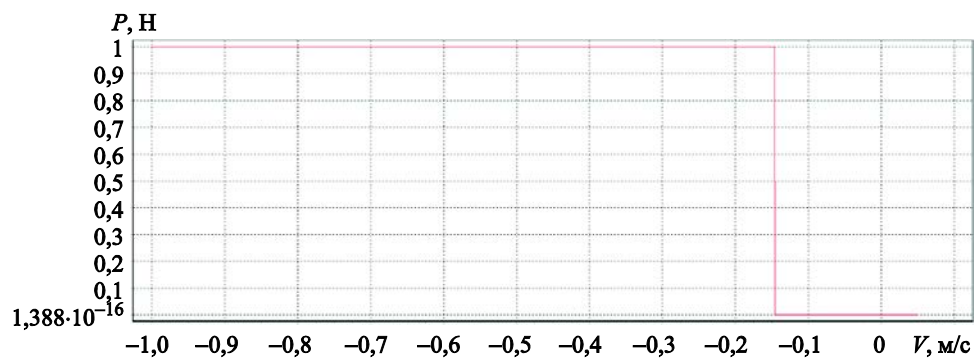


Рис. 11. Зависимость масштабного коэффициента усилия P в нелинейных связях от скорости удлинения V

В расчетном случае «Переброс веса» вследствие незначительного поворота конструкции как жесткого целого за время прохождения динамического процесса расчет осуществляется на неподвижной

модели с помощью изменения положения вектора гравитации по времени (рис. 12). В начальный момент времени система выставлена в положение, близкое к моменту опрокидывания. При этом с 0-й по 5-ю секунду происходит плавное приложение гравитационных сил в начальном направлении; с 5-й по 25-ю секунду — изменение направления вектора гравитационных сил в соответствии с угловым положением конструкции. По результатам расчета анализируются: максимальные усилия и ударные нагрузки в узле стыковки ТУТ с ПУА, величины упругих деформаций в элементах конструкции, а также перемещения и ускорения центров масс (ЦМ) РБ и КГЧ.

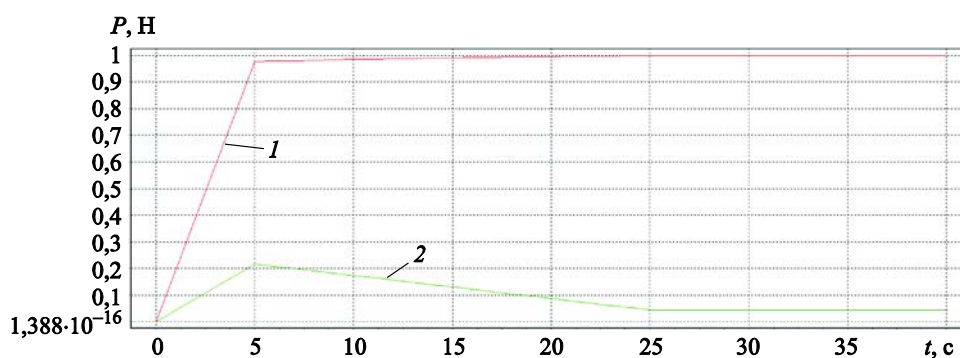


Рис. 12. Графики изменения величин компонентов вектора P гравитации по времени t :

1 — проекция на ось X ; 2 — проекция на ось Y

В расчетном случае «Передача веса» к модели прикладываются постоянное гравитационное нагружение и кинематическое воздействие от выдвижения опор ПС. В начальный момент динамического расчета система выставлена в конечное положение подъема. До 10-й секунды выполняется расчет деформированного состояния под действием гравитационных сил, с 10-й по 20-ю секунду происходит выдвижение опор до соприкосновения с ССБ, а с 20-й по 80-ю секунду осуществляются горизонтирование ССБ (вертикализация РКН) и передача веса от установщика на опоры ПС (рис. 13). При расчете рассматривался вариант установки с предварительно заданным алгоритмом выдвижения опор без выравнивания усилий при подъеме. Скорости каждой опоры в этом случае подбираются исходя условия одновременного подхода к опорным точкам ССБ на 20-й секунде расчета и последующего максимально равномерного горизонтирования ССБ (рис. 14).

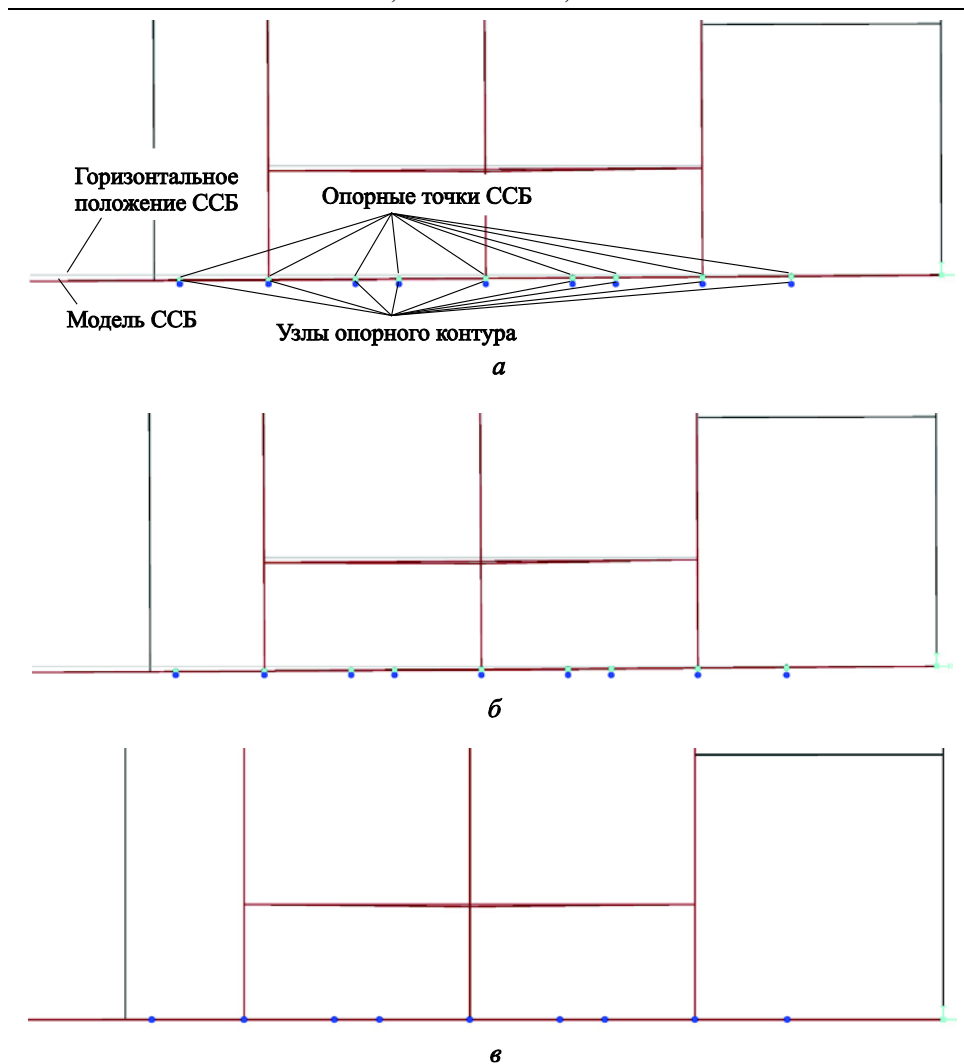


Рис. 13. Взаимное расположение модели ССБ и узлов опорного контура:
 а — в момент начала выдвижения опор ПС; б — при соприкосновении опор с элементами ССБ; в — при полном горизонтировании ССБ (вертикализации РКН)

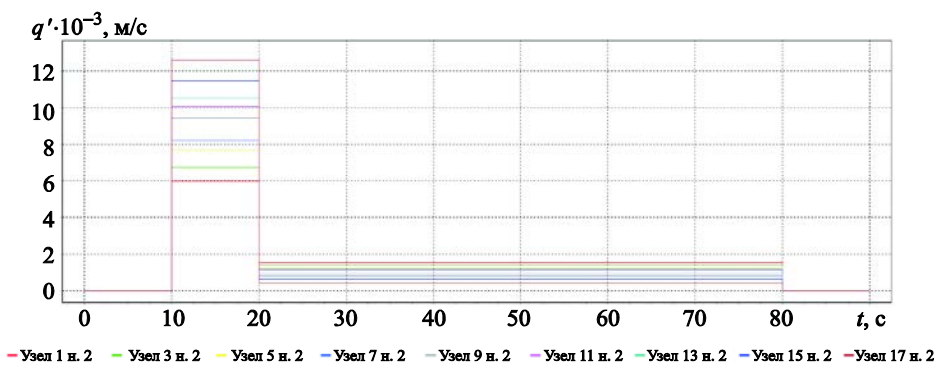


Рис. 14. Зависимости скорости q' выдвижения опор от времени t

Результаты исследования. В результате расчета модели для случая «Переброс веса» были получены значения перемещений и усилий в подвижной опоре между ТУТ и ПУА. На графике перемещений (рис. 15) нелинейная связь, направленная по оси Y , изменяет направление удлинения с 14-й по 15,3-ю секунду времени расчета. В этот момент происходит «переброс веса». Проскальзывание роликов ПУА (нелинейная связь по оси X) в момент «переброса веса» незначительно (≈ 1 мм). На графике усилий нелинейных связей (рис. 16) видны их изменения по направлению при времени расчета 14 с — начало «переброса» веса, цвета кривых соответствуют номерам нелинейных связей, указанных на рис. 4, в. При времени, равном 15,3 с, виден удар с последующими колебаниями системы — окончание «переброса» веса.

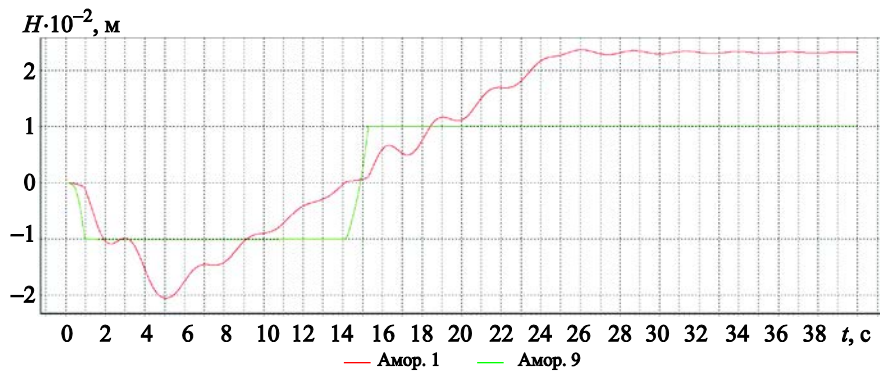


Рис. 15. Зависимости удлинения H в нелинейных связях от времени t для связей, работающих вдоль осей OX (—) и OY (—)

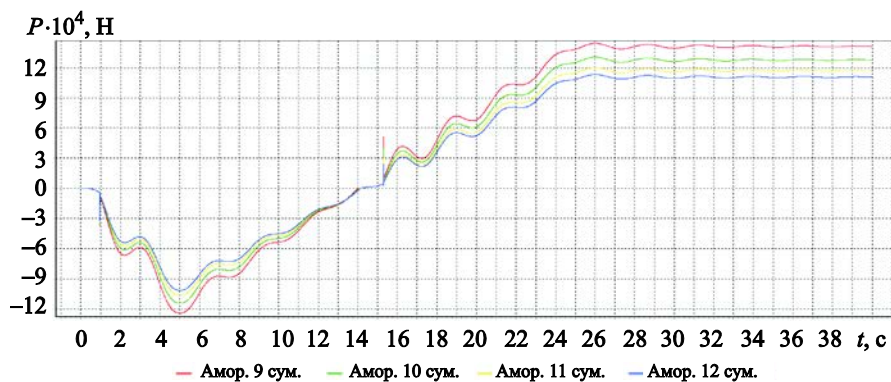


Рис. 16. Зависимости усилия P в нелинейных связях от времени t для связей 9 (—), 10 (—), 11 (—) и 12 (—), работающих вдоль оси OY

Сила ударного воздействия снижается при уменьшении технологического зазора узла связи между ТУТ и ПУА (рис. 17). Однако ширина зазора не может быть принята меньше 20 мм в связи с возникновением опасности заклинивания узла при попадании снега или образования наледи в зимний период эксплуатации.

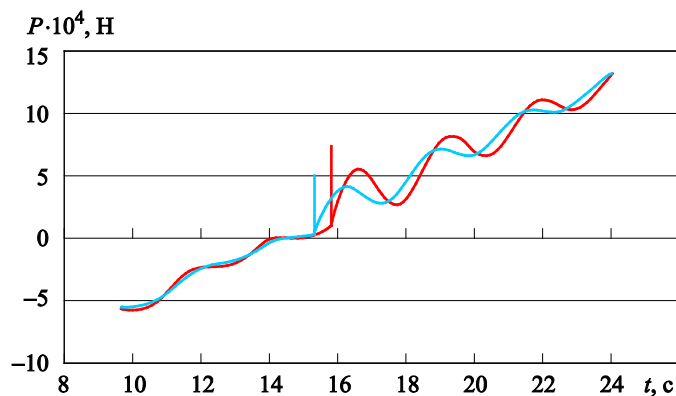


Рис. 17. Зависимости усилия P в нелинейной связи 9 от времени t , работающей вдоль оси OY при ширине технологического зазора 40 мм (—) и 20 мм (—)

Для расчетного случая «Переброс веса» также были рассчитаны значения перемещений и ускорений некоторых контрольных точек изделия (рис. 18, 19) и сделан вывод о том, что эти параметры не превышают допустимых значений.

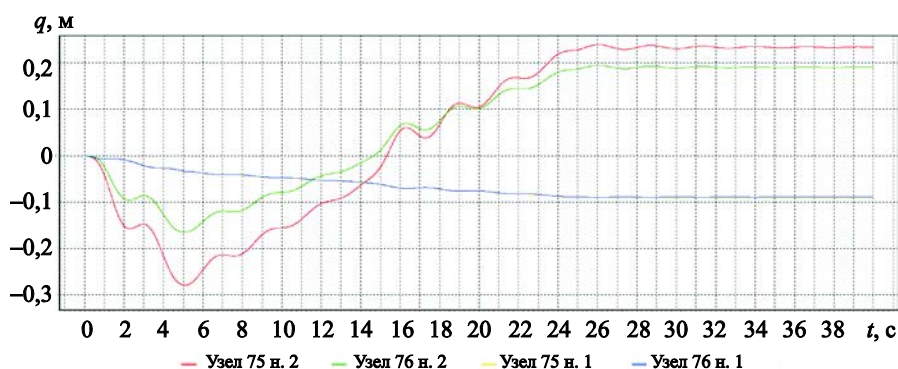


Рис. 18. Зависимости перемещения q ЦМ РБ РКН СТК (узел 76) вдоль осей OX (—) и OY (—) и ПТК+МБ (узел 75) вдоль осей OX (—, совпадает с синей кривой) и OY (—) от времени t

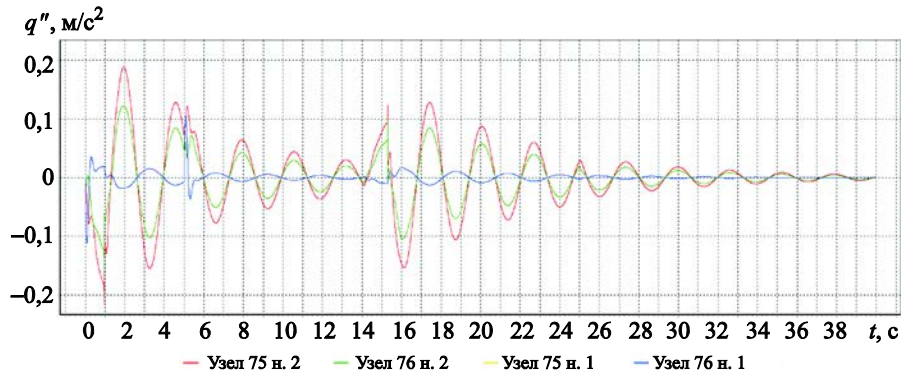


Рис. 19. Зависимости ускорения q'' ЦМ РБ РКН СТК (узел 76) вдоль осей OX (—) и OY (—) и ПТК+МБ (узел 75) вдоль осей OX (—, совпадает с синей кривой) и OY (—) от времени t

В целом, «Переброс веса» не является опасным этапом вертикализации, однако при проектировании верхнего подвижного узла связи ТУТ и стрелы ПУА необходимо предусмотреть демпферы с целью гашения колебаний после ударного изменения направления усилий (учитывались в расчетной модели).

При расчете случая «Передача веса» был выявлен значительный уровень слабо затухающих колебаний в контрольных точках изделия после окончания вертикализации (рис. 20, *a*). Увеличение жесткости стрелы позволяет уменьшить амплитуду колебаний, но не влияет на параметры затухания (рис. 20, *b*). Введение сильного демпфера по оси Y в узле стыковки ТУТ с ПУА позволяет полностью решить проблему гашения колебаний системы (рис. 20, *в*).

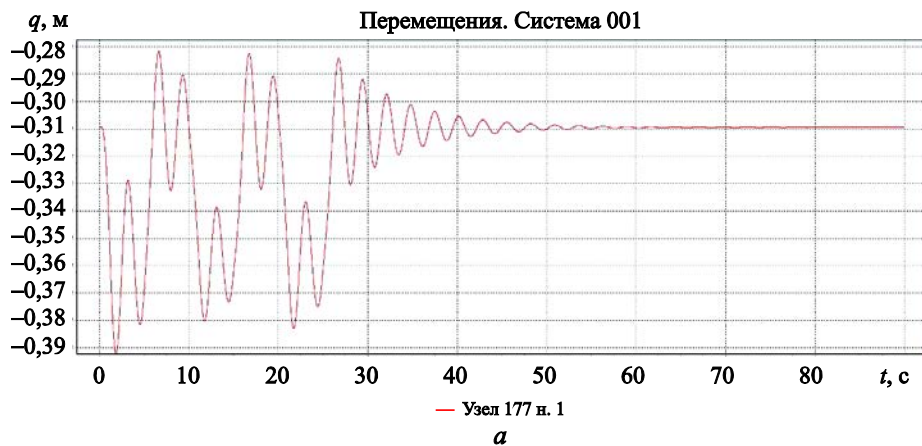


Рис. 20 (начало). Зависимости перемещения q ЦМ ПТК+МБ от времени t при воздействии нескольких порывов ветра со скоростью 10 м/с вдоль оси OX :
a — без демпфирования узла стыковки ТУТ с ПУА

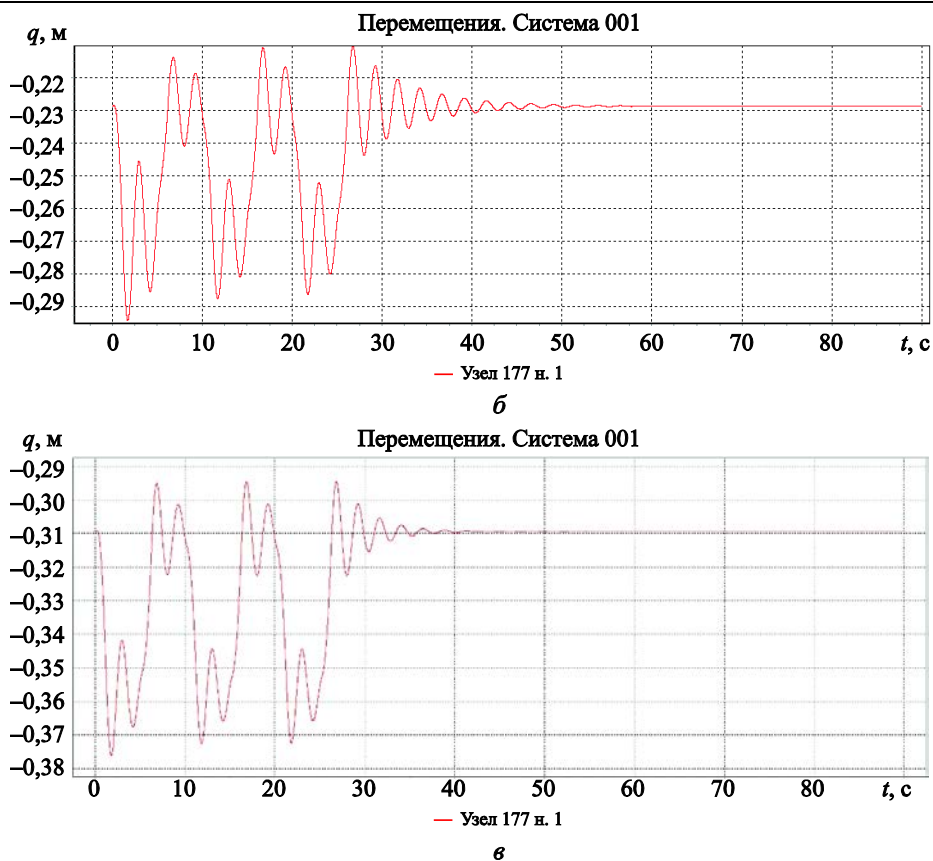
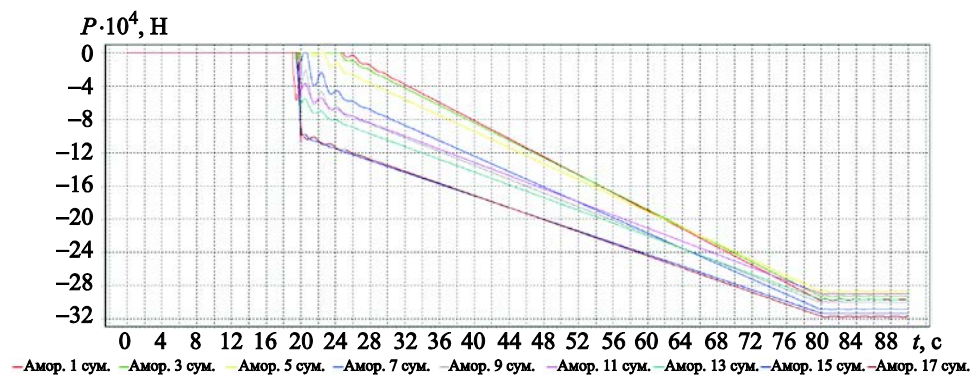


Рис. 20 (окончание). Зависимости перемещения q ЦМ ПТК+МБ от времени t при воздействии нескольких порывов ветра со скоростью 10 м/с вдоль оси OX :
 б — с увеличением жесткости стрелы ПУА; в — с демпфированием узла стыковки

Для системы с демпфером получены усилия в опорах ПС (рис. 21). Включение опор в рассматриваемом режиме происходит неравномерно. Разброс нагрузок между опорами при окончании подъема в пределах 25 кН. Максимальная ударная нагрузка 106,7 кН.



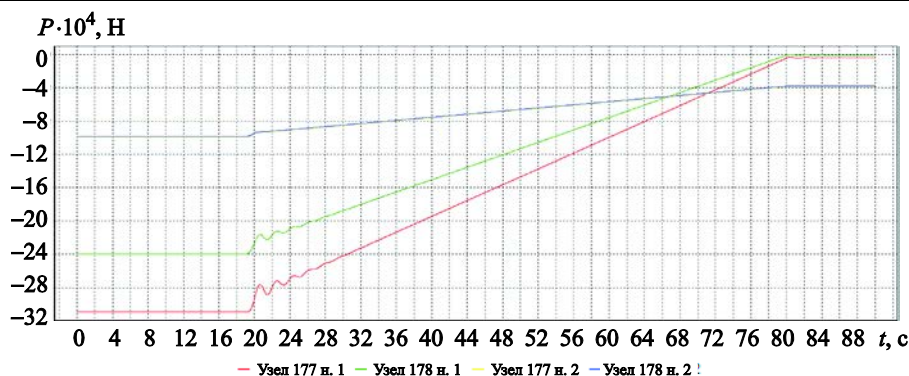


Рис. 22. Зависимости перемещения q ЦМ РБ РКН СТК (узел 178) вдоль осей OX (—) и OY (—) и ПТК+МБ (узел 177) вдоль осей OX (—) и OY (—), совпадает с синей кривой) от времени t

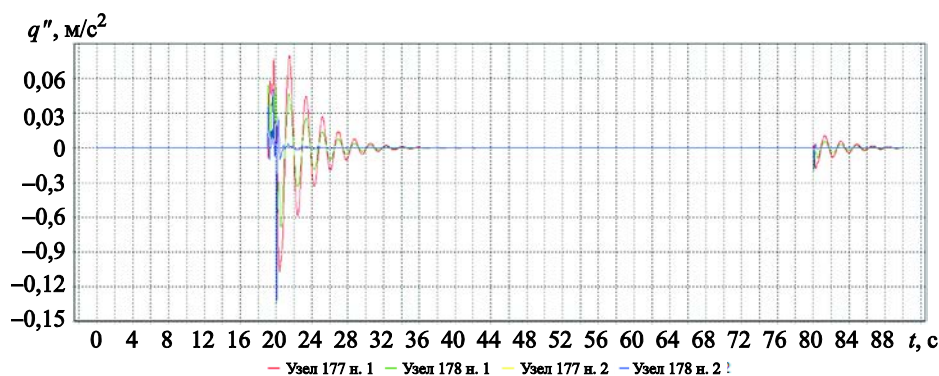


Рис. 23. Зависимости ускорения q'' ЦМ РБ РКН СТК (узел 178) вдоль осей OX (—) и OY (—) и ПТК+МБ (узел 177) вдоль осей OX (—) и OY (—), совпадает с синей кривой) от времени t

Рассчитаны также перемещения и ускорения в контрольных точках изделия (рис. 22, 23). Полученные величины не превышают допустимых значений.

Заключение. Исходя из результатов расчетов, можно сделать вывод о том, что работоспособность системы вертикализации РКН «Енисей» может быть достигнута при решении следующих инженерных задач:

- обеспечения высокой жесткости стрелы ПУА и рамы ТУТ, особенно в узле стыковки;
- оснащения узла стыковки ТУТ с ПУА демпфером, оборудованным переливным клапаном для обеспечения подъема РКН и гашения колебаний после «переброса» веса, а на конечном этапе подъема — для гашения колебаний при установке изделия на ПС (необходимо достаточно большое демпфирующее усилие);

- регулирования жесткости опор, находящихся в непосредственной близости от несущей оси поворота «ССБ-ТУТ-ПС», для обеспечения более «мягкого» контакта;
- создания системы управления выдвиганием опор ПС для обеспечения равномерности начала их контакта с изделием, а также распределения нагрузки между опорами в процессе установки.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] *НТС по космическому ракетному комплексу сверхтяжелого класса*. URL: <https://www.roscosmos.ru/27720/> (дата обращения: 21.01.2021).
- [2] Дидковский А.А., Мухина Е.Д., Чернов А.К. Разработка транспортного дирижабля для доставки негабаритных грузов на космодром «Восточный». *Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Аэрокосмическая техника*, 2020, № 63, с. 23–29. DOI: 10.15593/2224-9982/2020.63.03
- [3] Сутырина О.А., Языков А.В. Исследование вопросов движения платформы для вертикальной транспортировки перспективных РКН сверхтяжелого класса. *XI Академические чтения по космонавтике, посвященные памяти академика С.П. Королёва и других выдающихся отечественных ученых — пионеров освоения космического пространства: сборник тезисов, Москва, 26–29 января 2016 года*. Москва, Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана, 2015, с. 242–243.
- [4] Иванов А.Г., Игрицкий В.А. О возможностях применения гусеничных шасси для перевозки перспективных ракет космического назначения сверхтяжелого класса. *XLIV Академические чтения по космонавтике, посвященные памяти академика С.П. Королёва и других выдающихся отечественных ученых — пионеров освоения космического пространства: сборник тезисов, Москва, 28–31 января 2020 года*. Москва, Издательство МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2020, с. 642–644.
- [5] Удовик И.С., Золин А.В. Обоснование выбора точек подвеса транспортно-установочной тележки канатами механизма подъема на стартовых комплексах. *Инженерный журнал: наука и инновации*, 2020, № 7 (103), с. 7. DOI: 10.18698/2308-6033-2020-7-1998
- [6] Игрицкий В.А. О численной оценке удобства обслуживания ракет космического назначения сверхтяжелого класса и их элементов при горизонтальном и вертикальном вариантах технологии их подготовки. *XLIII Академические чтения по космонавтике, посвященные памяти академика С.П. Королёва и других выдающихся отечественных ученых — пионеров освоения космического пространства: сборник тезисов*. Москва, Издательство МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2019, с. 329–330.
- [7] Бармин И.В., ред. *Технологические объекты наземной инфраструктуры ракетно-космической техники* (Инженерное пособие). Книга 2. Москва, 2006.
- [8] Бирюков Г.П., Манасников Е.Н., Левин Б.К. *Технологическое оборудование отечественных ракетно-космических комплексов*. Фадеев А.С., Торпачев А.В., ред. Москва, Рестарт, 2011, 600 с.
- [9] Абакумов В.С., Зверев В.А., Ломакин В.В., Чугунков В.В., Языков А.В. Методический аппарат для расчетного анализа прочности конструкций стартового комплекса ракет-носителей серии «Союз». *Вестник Московско-*

го государственного технического университета имени Н.Э. Баумана. Сер. Машиностроение, 2008, спец. выпуск, с. 124–130.

- [10] Зверев В.А., Ломакин В.В., Языков А.В. Расчет нагрузок на ферменные конструкции агрегатов стартового комплекса при газодинамическом и ветровом воздействии. *Наука и образование: научное издание МГТУ им. Н.Э. Баумана*, 2013, № 3, с. 179–190.

Статья поступила в редакцию 10.06.2021

Ссылку на эту статью просим оформлять следующим образом:

Зотов В.Г., Никитин А.О., Языков А.В. Анализ динамических режимов работы системы вертикализации универсального стартового комплекса для перспективной ракеты космического назначения сверхтяжелого класса. *Инженерный журнал: наука и инновации*, 2021, вып. 8. <http://dx.doi.org/10.18698/2308-6033-2021-8-2103>



Зотов Василий Глебович — начальник сектора группы стартового оборудования отдела комплексного проектирования филиала АО «ЦЭНКИ» — НИИ СК, заслуженный конструктор Российской Федерации.
e-mail: v.zotov@russian.space



Никитин Александр Олегович — инженер отдела комплексного проектирования филиала АО «ЦЭНКИ» — НИИ СК, студент 6 курса кафедры «Стартовые ракетные комплексы» МГТУ им. Н.Э. Баумана. e-mail: a.nikitin@russian.space



Языков Андрей Владиславович — старший преподаватель кафедры «Стартовые ракетные комплексы» МГТУ им. Н.Э. Баумана, окончил МГТУ им. Н.Э. Баумана в 2005 г. Автор 19 научных работ в области динамики и теплообмена стартового оборудования ракет.
e-mail: andr_yaz@bmstu.ru

**Analysis of the dynamic operating modes
of the verticalization system
of the universal launch complex
for a promising super-heavy ILV**

© V.G Zotov.¹, A.O Nikitin.¹, A.V. Yazykov²

¹ Branch of JSC “TsENKI” — “Research Institute of Launch Complexes
named after V.P. Barmin”, Moscow, 119526, Russia

² Bauman Moscow State Technical University, Moscow, 105005, Russia

The paper presents the results of the analysis of the dynamic processes occurring at different stages of the operation of the installation unit of the super-heavy-class space rocket complex for one of the options for completing the Yenisei space rocket, intended for both the implementation of the lunar program and deep space exploration. Verticalization and installation of the ILV under consideration on the launch pad is carried out by a lifting and installation unit of an original design. The main feature of this unit is the presence of two tilting axes. The considered type of installation unit has not previously been used in domestic complexes for ILV. Despite some similarities of such a unit with a classic installer with lifting frame, in the course of its operation, specific operating modes arise with increased dynamic loading of the unit structure and the lifted product. The calculations made it possible to propose constructive solutions that ensure a decrease in dynamic loads on a space rocket during verticalization and installation on a launch pad.

Keywords: launch complex, launch vehicle, ILV, installer

REFERENCES

- [1] *NTS po kosmicheskomu raketnomu kompleksu sverkhtyazhelogo klassa* [Scientific and Technical Council on the space rocket complex of the super-heavy class]. Available at: <https://www.roscosmos.ru/27720/> (accessed January 21, 2021).
- [2] Didkovsky A.A., Mukhina E.D., Chernov A.K. *Vestnik Permskogo natsional'nogo issledovatel'skogo politekhnicheskogo universiteta. Aerokosmicheskaya tekhnika — Bulletin of the Perm National Research Polytechnic University. Aerospace engineering*, 2020, no. 63, pp. 23–29. DOI: 10.15593/2224-9982/2020.63.03
- [3] Sutyryna O.A., Yazykov A.V. Investigation of the issues of platform motion for vertical transportation of promising super-heavy ILVs. In: *XL Academic Readings in Cosmonautics: a collection of abstracts. Moscow, January 26–29, 2016*. Moscow, Bauman Moscow State Technical University, 2015, pp. 242–243.
- [4] Ivanov A.G., Igritskiy V.A. On the possibilities of using tracked chassis for the transportation of promising super-heavy space rockets. In: *XLIV Academic Readings on Cosmonautics: a collection of abstracts. Moscow, January 28–31, 2020. In 2 volumes*. Moscow, BMSTU Press, 2020, vol. 1, pp. 642–644.
- [5] Udovik I.S., Zolin A.V. *Inzhenerny zhurnal: nauka i innovatsii — Engineering Journal: Science and Innovation*, 2020, iss. 7 (103), p. 7. DOI: 10.18698/2308-6033-2020-7-1998
- [6] Igritskiy V.A. On the numerical assessment of the convenience of servicing super-heavy space rockets and their elements with horizontal and vertical variants

- of their preparation technology. In: *XLIII Academic Readings on Cosmonautics: Collection of abstract*. Moscow, BMSTU Press, 2019, pp. 329–330.
- [7] Barmin I.V., ed. *Tekhnologicheskiye ob'yekty nazemnoy infrastruktury raketno-kosmicheskoy tekhniki* [Technological objects of ground infrastructure of rocket and space technology]. (Engineering manual). Book 2. Moscow, 2006.
- [8] Biryukov G.P., Manaenkov E.N., Levin B.K. *Tekhnologicheskoye oborudovaniye otechestvennykh raketno-kosmicheskikh kompleksov* [Technological equipment of domestic rocket and space complexes]. Fadeev A.S., Torpachev A.V., eds. Moscow, Restart Publ., 2011, 600 p.
- [9] Abakumov V.S., Zverev V.A., Lomakin V.V., Chugunkov V.V., Yazykov A.V. *Vestnik Moskovskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta imeni N.E. Baumana. Ser. Mashinostroyeniye — Herald of the Bauman Moscow State Technical University. Series Mechanical Engineering*, 2008, Special iss., pp. 124–130.
- [10] Zverev V.A., Lomakin V.V., Yazykov A.V. *Nauka i obrazovaniye: nauchnoye izdaniye MGTU im. N.E. Baumana — Science and Education: scientific journal of the Bauman Moscow State Technical University*, 2013, no. 3, pp. 179–190.

Zotov V.G., Head of the Sector of the Launch Equipment Group, Integrated Design Department, Branch of the Center for the Operation of Ground Space Infrastructure JSC (“TsENKI”) — “Research Institute of Launch Complexes named after V.P. Barmin”, Honored Designer of the Russian Federation. e-mail: v.zotov@russian.space

Nikitin A.O., Engineer of the Integrated Design Department, Branch of the Center for the Operation of Ground Space Infrastructure JSC (“TsENKI”) — “Research Institute of Launch Complexes named after V.P. Barmin”; 6th year student, Bauman Moscow State Technical University. e-mail: a.nikitin@russian.space

Yazykov A.V. graduated from the Bauman Moscow State Technical University in 2005, Senior Lecturer, Department of Launch Rocket Complexes, Bauman Moscow State Technical University; author of 19 scientific papers in the field of dynamics and heat transfer of missile launch equipment. e-mail: andr_yaz@bmstu.ru