

Обоснование выбора точек подвеса транспортно-установочной тележки канатами механизма подъема на стартовых комплексах

© И.С. Удовик, А.В. Золин

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

Рассмотрена задача подбора оптимальных массогабаритных характеристик рамы транспортно-установочной тележки для перспективной ракеты-носителя сверхтяжелого класса. В основе — выбор мест крепления канатов механизмов подъема (лебедок) к тележке при переводе ракеты в вертикальное положение на стартовом комплексе. Представлены расчетные зависимости массы рамы, усилия в полиспастной системе от расстояния между точками крепления тележки к стойкам стартового стола и точками подвеса установщика канатами. Проанализировано влияние ширины поперечного сечения направляющих балок рамы тележки и угла наклона натянутых канатов к горизонту в начальный момент подъема ракеты в вертикальное положение на массогабаритные характеристики установщика. По результатам расчетов при использовании предлагаемого метода можно существенно уменьшить массу, габариты и стоимость тележки и приводов механизмов подъема по сравнению со случаем крепления канатов к консольной части рамы и случаем, когда в качестве исполнительных органов подъема стрелы установщика применяются гидравлические приводы.

Ключевые слова: тросовая система, канатно-полиспастная система, транспортно-установочная тележка, механизм подъема, лебедка, ракета-носитель сверхтяжелого класса, точка подвеса

Введение. В соответствии с направлением государственной политики Российской Федерации в области космической деятельности на период до 2030 г. в настоящее время ведутся разработки первой в России ракеты космического назначения (РКН) сверхтяжелого класса (СТК) [1, 2]. В связи с этим актуальны вопросы проектирования различного технологического оборудования, в частности, транспортно-установочного оборудования (ТУО), предназначенного для транспортирования ракеты с технического комплекса на стартовый комплекс (СК) с последующими переводом ее в вертикальное положение и установкой на пусковое устройство, а также для снятия ракеты с пускового устройства и ее транспортировки на технический комплекс в случае несостоявшегося пуска [3].

Традиционно в качестве приводов подъема стрел установщиков используются гидравлические приводы с многоступенчатыми гидроцилиндрами [4]. Однако такие приводы обладают рядом недостатков: высокие требования к технологии изготовления, ограниченные размеры гидроцилиндров, сложность в эксплуатации, необходимость частого проведения регламентных работ. Кроме того из-за большой

массы ракеты и особенностей расположения гидроцилиндров в системе действуют значительные нагрузки. В связи с этим гидроприводы изготавливают на заказ, и их стоимость достаточно высока. Ограничения по размерам гидроцилиндров приводят к существенному увеличению массы и габаритов самого установщика для удовлетворения требований к прочности и жесткости его конструкции.

В данной статье предложена альтернатива: в качестве установочного оборудования (УО) ракет рассматривается транспортно-установочная тележка (ТУТ) с канатными грузоподъемными механизмами (лебедками) в качестве исполнительных органов подъема, которыми оснащены СК [5]. Такие механизмы в составе УО по сравнению с гидроприводами обладают рядом преимуществ, среди которых простота эксплуатации и проведения регламентных работ, высокая технологичность конструкции. Применение такого альтернативного УО в составе ракетно-космического комплекса СТК может быть экономически оправдано и более целесообразно.

Цель настоящей статьи — в рамках предлагаемой технологии перевода РКН СТК в вертикальное положение на СК подобрать оптимальные массогабаритные характеристики (МГХ) ТУТ путем выбора мест крепления канатов механизмов подъема к тележке с помощью грузозахватных устройств. Рассмотрены конструкция предлагаемого УО, методика оптимизационного расчета, математическая модель ТУТ, необходимые расчетные зависимости. Приведены рекомендации по расположению точек подвеса тележки канатами.

Описание конструкции установочного оборудования. На рис. 1 представлена принципиальная схема установки РКН на стартовый стол (СС) с помощью предлагаемого лебедочного УО.

Канатно-полиспастная система (КПС) 1 и 9 (см. рис. 1) крепится к ТУТ с помощью грузозахватных устройств 8. КПС представляет собой два симметрично расположенных относительно плоскости симметрии рамы установщика (см. плоскость на рис. 1) полиспастных систем (ПС) 1 и 2, каждая из которых воспринимает половину общей нагрузки, приходящейся на КПС 1 и 9 соответственно.

Несущая часть ТУТ (рис. 2) представляет собой сварную раму (стрелу) 4, которая через систему балансиров 8 и 6 опирается на железнодорожные тележки 9 и 7. Рама состоит из направляющих балок 11, соединенных между собой поперечными балками 12. Все балки имеют коробчатое сечение (рис. 3). На раме 4 РКН 2 фиксируется с помощью нижней радиально-осевой опоры 1 и верхней радиальной опоры 5 (см. рис. 2). Дополнительно в качестве опоры ракеты использована тарированная опора 3 для уменьшения изгибающей нагрузки, действующей на нее. На СК рама шарнирно крепится к стойкам СС через проушины 10.

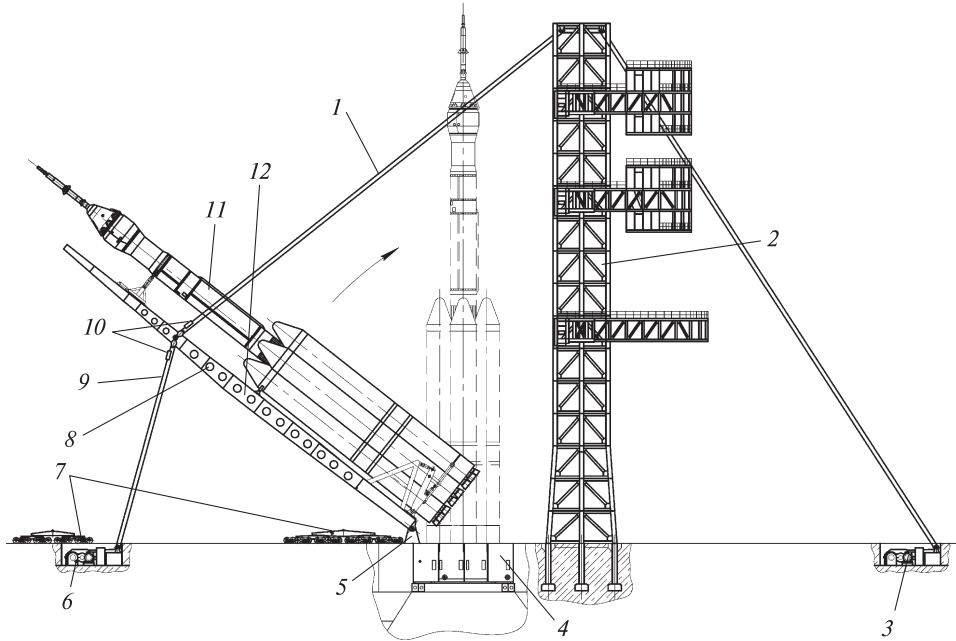


Рис. 1. Принципиальная схема установки ракеты на СС с помощью лебедочного УО: 1, 9 — канатно-полиспастная система (КПС) 1 и 9 соответственно; 2 — кабель-заправочная башня (КЗБ); 3 — приводы механизма подъема; 4 — СС; 5 — шарнирные узлы крепления ТУТ на СС; 6 — приводы механизма уравнивания; 7 — ходовые железнодорожные тележки с системой балансиров; 8 — грузозахватное устройство; 10 — устройства контроля натяжения канатов; 11 — РКН; 12 — рама ТУТ

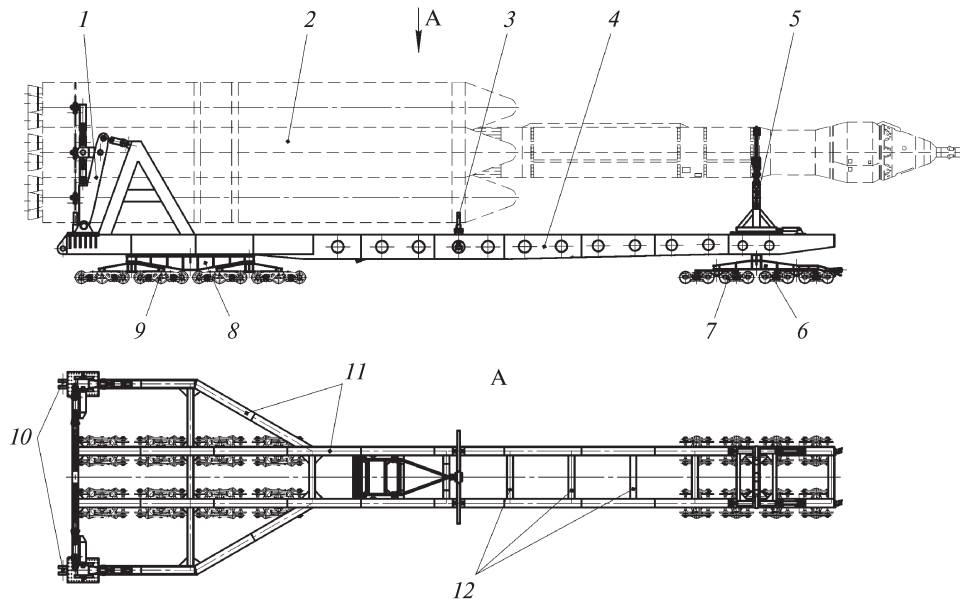


Рис. 2. Конструктивная схема транспортно-установочной тележки

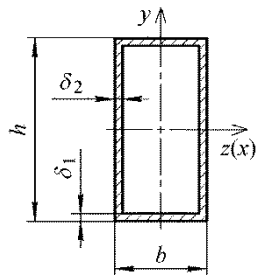


Рис. 3. Поперечные сечения направляющих и поперечных балок:

h — высота сечения; b — ширина сечения; δ_1 — толщина нижней и верхней полок; δ_2 — толщина боковых полок

Постановка задачи. Одним из наиболее важных этапов проектирования ТУО является подбор его оптимальных геометрических параметров и МГХ, удовлетворяющих требованиям технического задания, в частности требованиям к прочности и жесткости составных элементов [6–8]. Решение этой задачи позволяет снизить минимальную массу, уменьшить габариты и, как следствие, стоимость ТУО.

Один из способов решения поставленной задачи в рамках ТУО с использованием лебедочного УО является подбор мест крепления грузозахватных устройств к ТУТ по его длине при подъеме РКН в вертикальное положение на СК. Значимость этой задачи заключается в том, что выбор этих мест крепления формирует облик установщика, лебедок, КЗБ и влияет на их взаимное расположение на СК (см. рис. 1).

Предпосылкой к проведению данного исследования стало следующее. С одной стороны, в результате удаления узлов крепления канатов к раме тележки от узлов шарнирного закрепления установщика к стойкам СС увеличивается плечо «подъемной» силы со стороны КПС относительно этого шарнирного узла, вследствие чего уменьшается значение этой силы. С другой стороны, это приводит к увеличению массы и габаритов самого установщика, поскольку необходимо выполнять требования к прочности и жесткости рамы, что влечет за собой увеличение нагрузки в КПС. По этим причинам необходимо выбрать оптимальные места расположения данных узлов, при которых масса рамы установщика и нагрузка в КПС будут минимальны.

Таким образом, задачами настоящей работы являются следующие:

- анализ того, как изменяются МГХ стрелы ТУТ и нагрузка в КПС механизмов подъема при варьировании координат точек подвеса тележки канатами;
- выявление закономерностей между различными параметрами системы и выдвижение на их основе гипотез;
- оценка оптимального расположения узлов подвеса ТУТ канатами по длине рамы, при котором МГХ стрелы установщика минимальны и приводы механизма подъема испытывают минимальное нагружение.

Расчетная схема. Действие ветровых и инерционных нагрузок в поперечном направлении на установщик с РКН пренебрежимо мало по сравнению с нагрузками, действующими в плоскости симметрии тележки. Исходя из этого можно считать, что стрела установщика испытывает симметричное нагружение относительно данной плоскости.

Значит, в рамках рассматриваемой задачи для проведения прочностного расчета можно использовать плоскую расчетную схему (рис. 4).

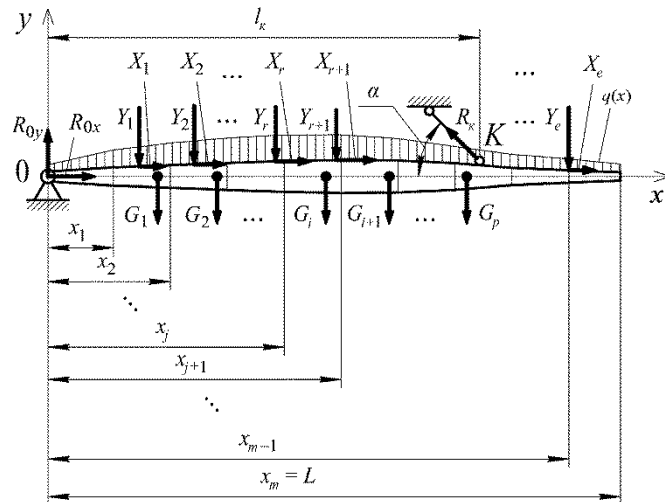


Рис. 4. Расчетная схема стрелы ТУТ:

l_k — расстояние от узлов крепления ТУТ к стойкам СС (точка O) до точек крепления тележки к КПС 1 (точка K); x_j — координаты x , в которых определяются поперечные сечения балки ($j = 0, \dots, m$); X_r, Y_r — составляющие сосредоточенных нагрузок со стороны опор по осям Ox и Oy соответственно ($r = 1, \dots, e$); G_i — сосредоточенные нагрузки со стороны поперечных балок ($i = 1, \dots, p$); $q(x)$ — распределенная по длине нагрузка от сил веса рамы; R_k — усилие в КПС 1; α — угол наклона натянутых канатов КПС 1 к горизонту; R_{0x}, R_{0y} — составляющие реакции в точке O по осям Ox и Oy соответственно

При этом вся конструкция стрелы заменяется эквивалентной балкой переменного сечения длиной L , испытывающей плоское (двухосное) напряженное состояние от действия изгибающего момента M_z в плоскости xu (рис. 4) и нормальных сил растяжения/сжатия N . При этом работа балки на кручение в данной задаче не рассматривается ввиду малости этой составляющей по сравнению с приведенными выше.

Поперечные балки ТУТ в этом исследовании заменяются эквивалентными точечными массами, расположенными в местах их соединения с основными направляющими балками.

Расчетная балка делится на m участков, на концах которых с координатами $x_j = 0, x_1, x_2, \dots, L$ (см. рис. 4) подбираются поперечные сечения из условия статической прочности:

$$\frac{N(x_j)}{n(x_j)S(x_j)} + \frac{M_z(x_j)}{n(x_j)W_z(x_j)} \leq [\sigma],$$

где $N(x_j)$ — величина нормальной силы растяжения/сжатия, Н; $n(x_j)$ — количество направляющих балок в заданном сечении $x = x_j$; $S(x_j)$ — площадь заданного поперечного сечения направляющей балки, м^2 ; $M_z(x_j)$ — изгибающий момент в плоскости xu , Н·м; $W_z(x_j)$ — момент сопротивления поперечного сечения относительно оси z , м^3 ; $[\sigma]$ — допускаемое нормальное напряжение в элементах конструкции, Па.

Величина допускаемого нормального напряжения $[\sigma]$ определяется по формуле

$$[\sigma] = \frac{K_{\text{сп}} \sigma_{\tau}}{[n_{\text{сп}}]},$$

где $K_{\text{сп}}$ — безразмерный коэффициент изменения предела текучести материала рамы (при расчете эквивалентного напряжения $K_{\text{сп}} = 1,0$); σ_{τ} — предел текучести материала рамы, МПа; $[n_{\text{сп}}]$ — суммарный минимально-допустимый коэффициент запаса статической прочности, определяемый согласно ГОСТ Р 51282–99.

Система координат расчетной схемы выбрана следующим образом:

- начало координат (точка O) является пересечением общей оси проушин (см. рис. 2) и плоскости, проходящей через ось симметрии ТУТ перпендикулярно горизонтальной плоскости основания;
- ось Ox направлена вдоль основных направляющих балок установщика;
- ось Oy направлена перпендикулярно горизонтальной плоскости основания;
- ось Oz направлена таким образом, чтобы составлять с осями Ox и Oy правую тройку векторов.

В качестве расчетного случая выбран начальный момент подъема ТУТ с РКН из горизонтального положения в вертикальное на СК с помощью лебедочного УО, связанный с отрывом стрелы установ-

щика от транспортного основания (ходовых тележек). Этот момент времени по сравнению с другими характеризуется действием наибольшего изгибающего момента на стрелу установщика как основного силового фактора. Кроме того, плечо силы тяжести и инерции поднимаемой системы относительно точки O принимает наибольшее значение [5]. В этом случае нагрузка на полиспагт максимальна.

Связь тележки со стойками СС моделируется с помощью неподвижной шарнирной опоры, не допускающей линейных перемещений по осям Ox и Oy , а соединение ТУТ с канатами КПС 1 и 2 задается гибкой связью, реакция в которой направлена вдоль самой связи (см. рис. 4). Таким образом обеспечивается статическая определенность балки.

В расчетах динамическая составляющая, связанная с отрывом ТУТ с РКН от транспортного основания, учитывается введением дополнительного коэффициента n_y поперечной перегрузки рамы установщика, который задается нормами прочности на основании регламентированных режимов работы грузоподъемного оборудования. В данной задаче принимаем

$$n_y = 1,25.$$

В дальнейшем при проектировании агрегата это значение может быть уточнено [5].

На расчетную балку действует следующий комплекс внешних нагрузок (см. рис. 4):

1) сосредоточенные нагрузки со стороны опор (сила тяжести и инерционные нагрузки РКН и самой опоры, разложенные на составляющие по координатным осям Ox и Oy):

$$X_r, Y_r, r = \overline{1, e},$$

где e — количество сосредоточенных нагрузок со стороны опор;

2) сосредоточенные нагрузки со стороны поперечных балок

$$G_i = m_i g n_y, i = \overline{1, p},$$

где m_i — масса i -й поперечной балки, кг; $g = 9,81$ — ускорение свободного падения, m/c^2 ; p — число поперечных балок;

3) распределенная по длине нагрузка от сил веса (с учетом инерционных сил) каждой направляющей балки $q(x)$, которая является линейной интерполяцией значений

$$q_j = S_j \rho g n_y, j = \overline{1, m},$$

где S_j — площадь j -го поперечного сечения направляющей балки, м^2 ; ρ — плотность материала рамы ТУТ, $\text{кг}/\text{м}^3$; m — число участков разбиений балки;

4) суммарная нагрузка R_k в КПС 1, направленная под углом α к горизонту, приложенная к ТУТ на расстоянии l_k от точки O ;

5) реакция R_0 в шарнирном узле крепления ТУТ к стойкам СС, разложенная на составляющие по координатным осям R_{0x} и R_{0y} .

Сила трения в шарнирных узлах крепления тележки к стойкам СС не учитывается в связи с ее малостью по сравнению с остальными нагрузками.

Метод расчета. Целевой функцией проводимого оптимизационного расчета является функция вида

$$M = f(l_k).$$

Здесь M — масса стрелы установщика; l_k — расстояние от шарнирных узлов крепления ТУТ к стойкам СС до точек крепления канатов к ТУТ (расстояние OK , см. рис. 4).

Однако установить явную зависимость между l_k и M на данном этапе не представляется возможным. Это обусловлено тем, что геометрические параметры (размеры заданных сечений балок рамы) установщика зависят от массовых характеристик (распределенной нагрузки от веса установщика), а массовые характеристики — от выбранных геометрических параметров (т. е. исходные данные зависят от конечного решения).

В работах [9–11] приведены различные методы и алгоритмы оптимизации параметров конструкций, наиболее близких к рассматриваемой в настоящей работе. На основании этих методик для поиска рационального места крепления грузозахватных устройств к ТУТ по длине рамы авторами данной статьи была выработана методика расчета, базирующаяся на следующих итерационных процедурах.

1. Задать исходные данные по материалу рамы, длинам и взаимному расположению направляющих и поперечных балок, нагрузкам со стороны опор и РКН, а также нагрузкам со стороны поперечных балок.

2. Зафиксировать некоторое значение расстояния l_k .

3. Составить расчетную балочную схему рамы (см. рис. 4).

4. Построить эпюры изгибающего момента M_z и нормальных сил растяжения/сжатия N , т. е. найти зависимости вида

$$M_z = f(x), \quad N = f(x).$$

5. Разбить по длине эквивалентную расчетную балку на m участков (контрольные точки), на концах каждого из которых задать начальные приближения высоты h_j поперечного сечения (см. рис. 3) направляющих балок. Соответственно, высоты h_j остальных промежуточных сечений x определяются путем линейной интерполяции по двум ближайшим значениям высот.

6. Найти зависимость распределенной нагрузки от сил веса рамы установщика $q(x)$ путем пересчета, согласно заданным значениям высот h_j , массовых характеристик балки.

7. Исходя из условия прочности рассчитать минимально допустимые значения высот h'_j поперечных сечений во всех контрольных точках.

8. Округлить полученные значения высот h'_j в большую сторону до ближайших стандартных значений, предварительно указанных в исходных данных.

9. Сравнить округленные значения высот h'_j с предыдущими значениями (см. п. 5). Если значение хотя бы одной из высот не равно предыдущему ее значению, то действия по п. 6–8 необходимо повторить. Расчеты повторяются до тех пор, пока все значения не совпадут.

10. В качестве результата для данного значения l_k следует найти значения массы M рамы установщика, суммарного усилия $R_{к1}$ в одной полиспастной системе (ПС 1), координаты $x_{цм}$ центра масс системы ТУТ — РКН и другие необходимые величины.

11. Изменить значение расстояния l_k на некоторую константу (заданный шаг) и повторить действия по п. 3–10.

12. По полученным данным найти искомую зависимость

$$M = f(l_k),$$

а также зависимости

$$R_{к1} = f(l_k),$$

$$x_{цм} = f(l_k).$$

13. Найти минимальное значение M_{\min} функции $M(l_k)$ и соответствующее ему значение l'_k .

Алгоритм данного расчета представлен в виде блок-схемы на рис. 5.

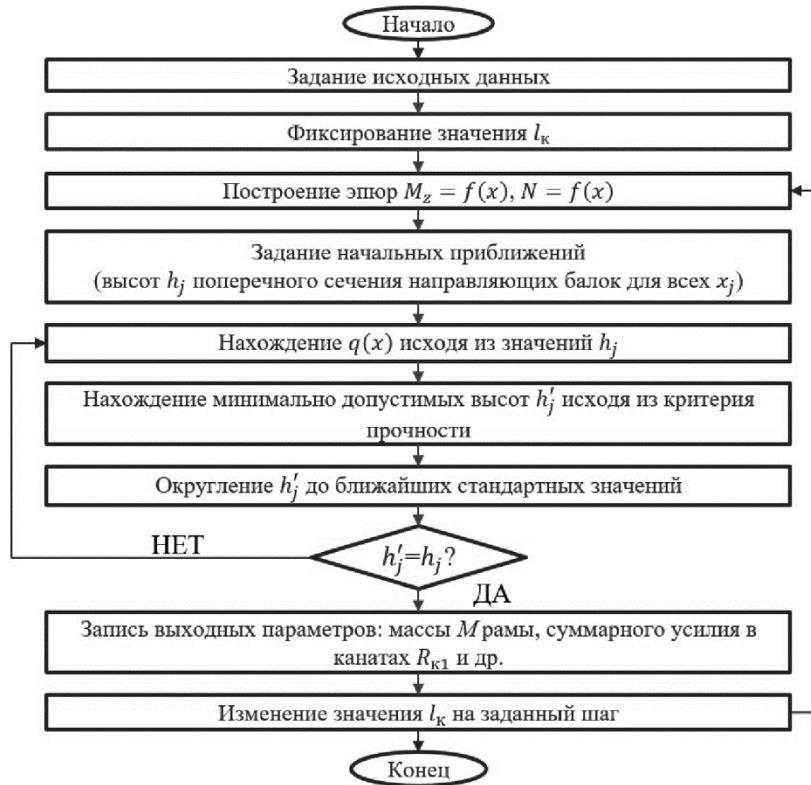


Рис. 5. Блок-схема алгоритма расчета

Расчет проводится в программном комплексе Mathcad 15.

Результаты исследования. Были проведены два независимых исследования с сериями расчетов, выполненных по представленной ранее методике.

Первое исследование посвящено изучению влияния величины ширины b поперечного сечения направляющих балок (стороны сечения, параллельной горизонтальной плоскости, см. рис. 3) на МГХ рамы установщика и оптимальное расстояние l_k до точки подвеса ТУТ канатами.

В рамках второго исследования изучено влияние величины угла α наклона натянутых канатов к горизонту в начальный момент подъема ТУТ в вертикальное положение на МГХ рамы и оптимальное расстояние l_k .

Изучение влияния параметров b и α на МГХ стрелы обусловлено необходимостью иметь предварительные исходные данные на

проектирование КЗБ и опор ТУТ. Данные расчеты не являются частью многокритериальной оптимизации.

Далее рассмотрим каждое из исследований подробнее.

В рамках первого исследования для каждого из значений b были получены зависимости массы рамы установщика M (без учета масс опор и РКН), нагрузки в полиспадной системе $1 R_{к1}$ от расстояния l_k . Данные зависимости представлены на рис. 6 и 7. Шаг изменения значения l_k — 5 м. Для уточнения оптимального значения l_k вблизи минимума функции $M(l_k)$ шаг уменьшен до 1 м. Следует отметить, что для всех значений l_k масса рамы ТУТ с учетом массы опор, суммарная масса рамы и РКН отличаются от M на заданную константу.

Для расчета были использованы следующие исходные данные:

| | |
|---|------|
| Число разбиений m расчетной балки | 10 |
| Длина расчетной балки L , м | 63,5 |
| Минимально-допустимая высота поперечного сечения направляющих балок h , м | 0,5 |
| Толщины сечений направляющих балок δ_1 и δ_2 , м | 0,04 |

В качестве материала рамы ТУТ выбрана сталь 09Г2С (ГОСТ 19281–2014). Нагрузки со стороны РКН, опор и поперечных балок взяты из работы [5]. Стандартные значения высот h : 0,5...4 м с шагом 0,1 м. Угол α наклона натянутых канатов к горизонту — 45°.

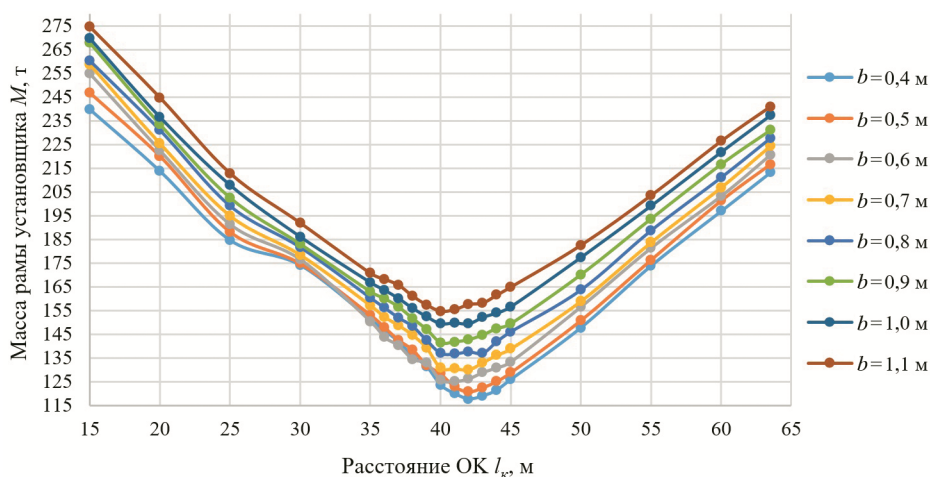


Рис. 6. Зависимость массы рамы установщика от расстояния l_k для различных значений ширины b поперечного сечения направляющих балок

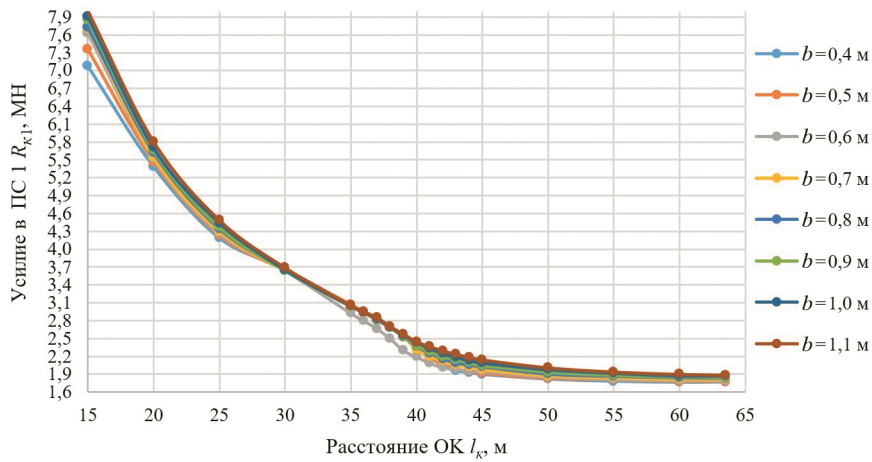


Рис. 7. Зависимость усилия R_{k1} в ПС 1 от расстояния l_k для различных значений ширины b поперечного сечения направляющих балок

На основании данных расчетов получены зависимости минимальной массы M_{min} рамы установщика и соответствующего ей усилия R_{k1} в ПС 1 в зависимости от ширины b поперечного сечения направляющих балок (рис. 8, 9).

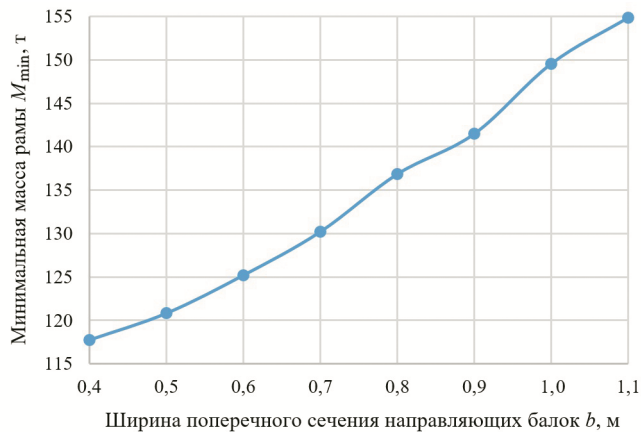


Рис. 8. Зависимость минимальной массы M_{min} рамы установщика от ширины b поперечного сечения направляющих балок

Расстояние l'_k , соответствующее значению M_{min} , для $b = 0,4 \dots 1,1$ м изменяется в диапазоне $40 \dots 42$ м, а координата $x_{цм}$ центра масс системы ТУТ—РКН — в диапазоне $19,5 \dots 23,5$ м.

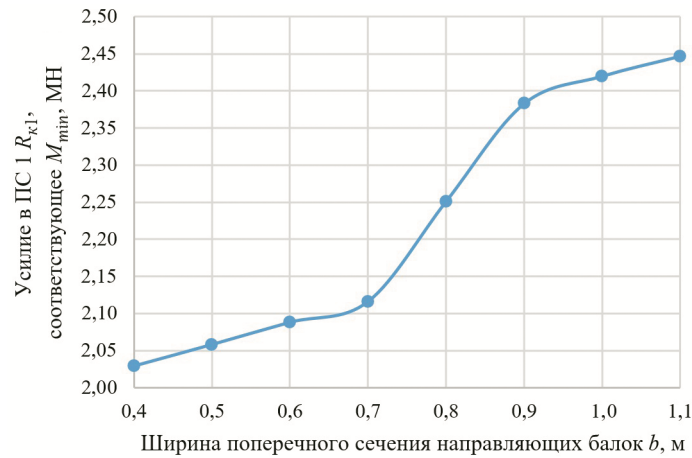


Рис. 9. Зависимость усилия $R_{к1}$ в ПС 1, соответствующее минимальной массе M_{min} рамы, от ширины b поперечного сечения направляющих балок

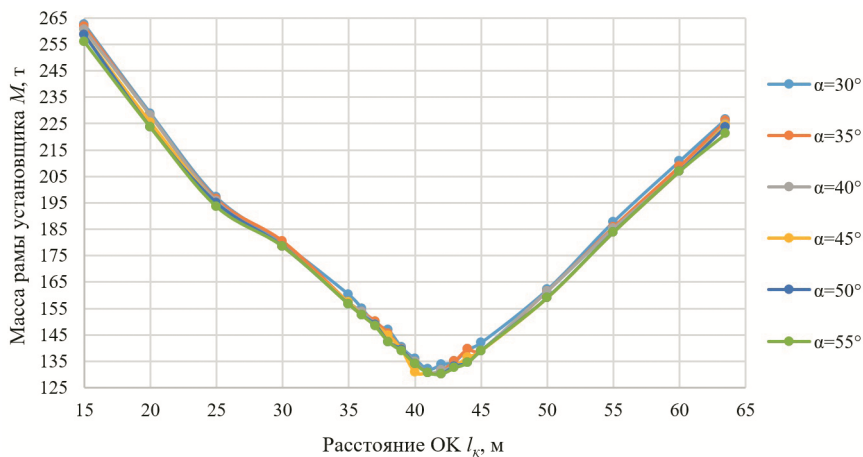


Рис. 10. Зависимость массы рамы установщика от расстояния l_k для различных значений угла α наклона натянутых канатов к горизонту

В рамках второго независимого исследования для каждого из значений угла α получены зависимости массы рамы установщика M , нагрузки в ПС 1 $R_{к1}$ от расстояния l_k (рис. 10 и 11). Шаг изменения значения l_k — 5 м. Для нахождения оптимального значения l_k вблизи минимума функции $M(l_k)$ шаг уменьшен до 1 м.

Исходные данные — такие же, что для первого исследования. Однако в отличие от него значение ширины фиксировано: $b = 700$ м. На основании данных расчетов получены зависимости минимальной массы M_{min} рамы установщика и соответствующего ей усилия $R_{к1}$ в ПС 1 в зависимости от угла α наклона натянутых канатов к горизонту (рис. 12, 13).

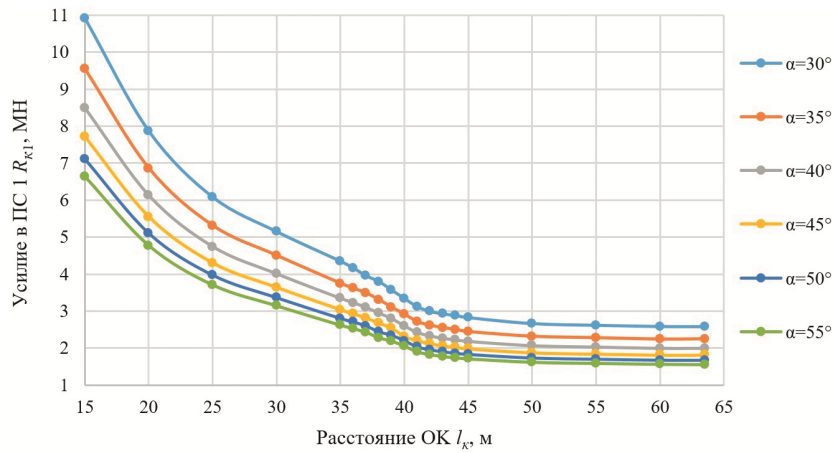


Рис. 11. Зависимость усилия R_{k1} в ПС 1 от расстояния l_k для различных значений угла α наклона натянутых канатов к горизонту

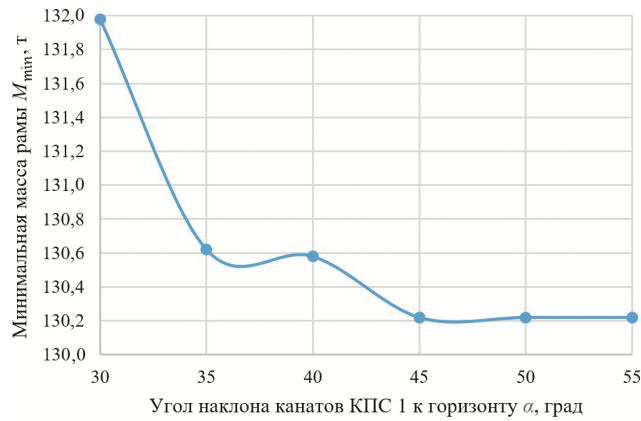


Рис. 12. Зависимость минимальной массы M_{min} рамы установщика от угла α наклона натянутых канатов КПС 1 к горизонту

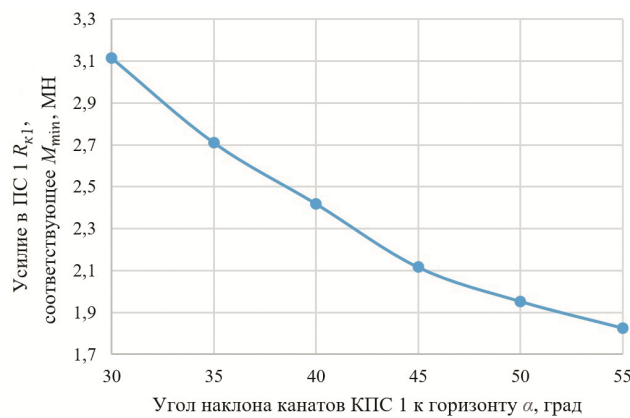


Рис. 13. Зависимость усилия R_{k1} в ПС 1, соответствующее минимальной массе M_{min} рамы, от угла α наклона натянутых канатов КПС 1 к горизонту

Расстояние l'_k , соответствующее значению M_{\min} , для $\alpha = 30 \dots 55^\circ$, изменяется в диапазоне 40...42 м, а значение координаты $x_{\text{цм}}$ центра масс системы ТУТ—РКН лежит в диапазоне 20...23 м.

Выводы. Из результатов расчетов (см. рис. 6, 7, 10, 11) видно, что на значение массы рамы установщика в большей степени влияет ширина b поперечного сечения, а на значение усилия в канатах ПС 1 — значение угла α .

На рис. 7, 11 показано, что на рассматриваемом участке зависимость нагрузки в КПС 1 от расстояния l_k носит экспоненциальный характер. Зависимость массы установщика от l_k (см. рис. 6, 10) имеет явный прогиб с характерным значением минимума функции в диапазоне 40...42 м.

Как показали результаты исследования (см. рис. 6, 10), правильный подбор мест крепления канатов к ТУТ позволяет сэкономить до 45 % материала, из которого изготавливается рама (по сравнению со случаем крепления канатов на «консольной» части рамы, когда $l_k = 63,5$ м), что в переводе на массу может составлять десятки и сотни тонн металла.

Результаты расчетов привели к выводу, что во всех случаях (см. рис. 6, 10) оптимальное значение расстояния l_k находится в относительно узком диапазоне 40...42 м, что составляет приблизительно 63...66 % от полной длины рамы установщика. Таким образом, значения ширины направляющих балок b и угла α наклона рамы ТУТ к горизонту на оптимальное значение l_k влияют мало. Однако наблюдается тенденция некоторого возрастания этого значения при увеличении ширины b .

Заключение. На основании закономерностей, выявленных в результате проведения оптимизационного расчета, можно сформулировать рекомендации по выбору мест крепления грузозахватных устройств к ТУТ для подъема перспективной ракеты-носителя СТК в вертикальное положение и возвращения в горизонтальное положение с помощью канатных грузоподъемных механизмов. Их использование позволяет существенно снизить массу, уменьшить габариты и стоимость тележки и механизмов подъема, а также выбрать наиболее рациональную форму агрегата обслуживания. Следует отметить, что область применения настоящей методики не ограничивается расчетом ракетных комплексов СТК, где применяется лебедочное УО, а распространяется на УО любых других комплексов, где используется горизонтальный способ транспортирования ракеты на СК с последующим переводом ее в вертикальное положение.

Кроме того, применение лебедочного УО по сравнению с гидравлическими приводами подъема на стреле установщика, где точки

крепления гидроцилиндров к раме, как правило, расположены достаточно близко к осям вращения стрелы, что обусловлено особенностями изготовления гидроцилиндров и ограничениями их размеров как по длине, так и диаметру, имеет явное преимущество относительно металлоемкости, массы, габаритов стрелы установщика.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Основные положения *ОСНОВ государственной политики Российской Федерации в области космической деятельности на период до 2030 года и дальнейшую перспективу* (утв. Президентом РФ от 19.04.2013 № Пр-906). URL: http://www.roscosmos.ru/media/files/docs/3/osnovi_do_2030.doc (дата обращения 04.06.2020).
- [2] НТС по космическому ракетному комплексу сверхтяжелого класса. *Роскосмос. Новости*. 06.11.2019. URL: <https://www.roscosmos.ru/27720> (дата обращения 04.06.2020).
- [3] Бармин И.В., ред. *Технологические объекты наземной инфраструктуры ракетно-космической техники*. В 3 кн. Москва, Полиграфикс РПК, 2005, кн. 1, 112 с., 2006, кн. 2, 375 с., 2012, кн. 3, 251 с.
- [4] Новожилов Б.М. Гидравлические механизмы подъема установочных агрегатов. *Аэрокосмический научный журнал*, 2016, № 6, с. 15–25. DOI: 10.7463/aersp.0616.0851796
- [5] Zolin A., Udovik I. Dynamic analysis of non-linear processes in super heavy-lift launch vehicle erector and polyspast lifting system. *AIP Conference Proceedings*, 2019, vol. 2171, art. no. 120010. <https://aip.scitation.org/doi/abs/10.1063/1.5133266>
- [6] Бармин И.В., Зверев В.А., Украинский А.Ю., Чугунков В.В., Языков А.В. Обоснование некоторых основных характеристик стартового оборудования космодромов XXI века. *Инженерный журнал: наука и инновации*, 2013, вып. 3. DOI: 10.18698/2308-6033-2013-3-630
- [7] Караштин В.М., Катков А.Г., Родченко В.В. *Основы проектирования систем наземного обеспечения*. Москва, Изд-во МАИ, 1998, 312 с.
- [8] Абакумов В.С., Зверев В.А., Ломакин В.В. Методика расчетного анализа динамики отвода подвижных конструкций агрегатов ракетно-космических стартовых комплексов. *Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Машиностроение*, 2008, спец. вып. 1, с. 131–135.
- [9] Толоконников А.С., Калабин П.Ю. Оптимизация геометрических параметров пролетных балок мостовых кранов с поясами разной толщины. *Известия Тульского государственного университета. Сер. Технические науки*, 2009, вып. 2, ч. 1, с. 53–57.
- [10] Beno, P., Kozak, D., Konjatic, P.: Optimization of thin-walled constructions in CAE system ANSYS. *Tehnicki Vjesnik*, 2014, vol. 21, iss. 5, pp. 1051–1055.
- [11] Каледин В.О., Штейнбрехер О.А. Алгоритм оптимизации многоэлементных конструкций с ограничениями по прочности и габаритам. *Научно-технический вестник Поволжья*, 2016, № 3, с. 113–115.

Статья поступила в редакцию 13.02.2020

Ссылку на эту статью просим оформлять следующим образом:

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, вып. 7.

<http://dx.doi.org/10.18698/2308-6033-2020-7-1998>

Удовик Илья Сергеевич — студент VI курса кафедры «Стартовые ракетные комплексы» МГТУ им. Н.Э. Баумана, автор 14 публикаций в области ракетно-космической техники. e-mail: kafsm8@bmstu.ru

Золин Анатолий Владимирович — старший преподаватель кафедры «Стартовые ракетные комплексы» МГТУ им. Н.Э. Баумана, ведущий инженер АО «Особое конструкторское бюро Московского энергетического института», автор 22 публикаций в области ракетно-космической техники. e-mail: kafsm8@bmstu.ru

Substantiation of the selection of the points for the erector suspension with the lifting mechanism ropes at launch complexes

© I.S. Udovik, A.V. Zolin

Bauman Moscow State Technical University, Moscow, 105005, Russia

The paper considers the problem of selecting the optimal weight and size characteristics of an erector frame for advanced super heavy-lift launch vehicle by selecting the suspension points of lifting mechanism ropes to the erector when transferring the rocket to a vertical position at the launch complex. The calculated dependences of frame weight and the force in polyspast system on the distance between the points of erector attachment to the racks of the launch pad and the points of erector suspension with the ropes are presented. The effect of the transverse width of the erector frame guide beams and the angle between the tight ropes and the horizon at the initial moment of lifting the rocket to the vertical position on the weight and dimensions of the erector is analyzed. According to the calculation results there is the possibility of a significant reduction in the weight, size and cost of the erector and the drives of lifting mechanisms in comparison with the case when ropes are attached to the cantilever part of the frame and systems using hydraulic drives as the lifting end organs of the erector beam.

Keywords: rope system, reeving system, erector, lifting mechanism, winch, super heavy-lift launch vehicle, hook station

REFERENCES

- [1] *Osnovnye polozheniya OSNOV gosudarstvennoy politiki Rossiyskoy Federatsii v oblasti kosmicheskoy deyatel'nosti na period do 2030 goda i dalneyshuyu perspektivu, utverzhdennye Prezidentom Rossiyskoy Federatsii ot 19 aprelya 2013 g. № Pr-906* [The Main provisions of the PRINCIPLES of the state policy of the Russian Federation in the field of space activities for the period up to 2030 and beyond, approved by the President of Russian Federation on April 19, 2013, no. Pr-906]. Available at: http://www.roscosmos.ru/media/files/docs/3/osnovi_do_2030.doc (accessed December 22, 2019).
- [2] *NTS po kosmicheskomu raketnomu kompleksu sverkhtyazhelogo klassa* [Scientific and technical council for the space rocket complex of super-heavy class]. Available at: <http://en.roscosmos.ru/21093/> (accessed December 22, 2019).
- [3] Barmin I.V., ed. *Tekhnologicheskie obyekty nazemnoy infrastruktury raketno-kosmicheskoy tekhniki. Inzhenernoe posobie* [Technological objects of aerospace ground infrastructure. Engineering manual]. In 3 books. Moscow, Poligrafiks RPK Publ., 2005–2012.
- [4] Novozhilov B.M. *Aerokosmicheskii nauchnyy zhurnal — Aerospace scientific journal*, 2016, no. 6, pp. 15–25. DOI: 10.7463/aersp.0616.0851796
- [5] Zolin A., Udovik I. Dynamic analysis of non-linear processes in super heavy-lift launch vehicle erector and polyspast lifting system. *Proceedings of AIP Conference*, 2019, vol. 2171, art. no. 120010. <https://aip.scitation.org/doi/abs/10.1063/1.5133266>
- [6] Barmin I.V., Zverev V.A., Ukrainsky A.Yu., Chugunkov V.V., Yazykov A.V. *Inzhenernyy zhurnal: nauka i innovatsii — Engineering Journal: Science and Innovation*, 2013, iss. 3. DOI: 10.18698/2308-6033-2013-3-630

- [7] Karashtin V.M., Katkov A.G., Rodchenko V.V. *Osnovy proektirovaniya sistem nazemnogo obespecheniya* [Fundamentals of designing ground support system]. Moscow, MAI Publ., 1998, 312 p.
- [8] Abakumov V.S., Zverev V.A., Lomakin V.V. *Vestnik MGTU im. N.E. Baumana. Ser. Mashinostroyeniye — Herald of the Bauman Moscow State Technical University. Series: Mechanical Engineering*, 2008, special iss. 1, pp. 131–135.
- [9] Tolokonnikov A.S., Kalabin P.Yu. *Izvestiya Tulskogo gosudarstvennogo universiteta. Tekhnicheskie nauki — Izvestiya Tula State University. Technical Sciences*, 2009, no. 2, pp. 53–57.
- [10] Beno P., Kozak D., Konjatic P. *Tehnički vjesnik — Technical Gazette*, 2014, vol. 21, no. 5, pp. 1051–1055.
- [11] Kaledin V.O., Shteinbrekher O.A. *Nauchno-tehnicheskiy vestnik Povolzhya — Scientific and Technical Volga Region Bulletin*, 2016, no. 3, pp. 113–115.

Udovik I.S., sixth year student, Department of Rocket Launch Complexes, Bauman Moscow State Technical University, author of 14 research publications in the field of rocket and space technology. e-mail: kafsm8@bmstu.ru

Zolin A.V., Senior lecturer, Department of Rocket Launch Complexes, Bauman Moscow State Technical University. Leading engineer, Special design bureau, Moscow Power Engineering Institute, author of 22 research publications in the field of rocket and space technology. e-mail: kafsm8@bmstu.ru