

Влияние дополнительного оборудования на параметры несущих конструкций башнеподобных агрегатов космических ракетных комплексов

© В.А. Игрицкий

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

В составе наземного оборудования космических ракетных комплексов часто используются различные башнеподобные агрегаты, например, мобильные башни обслуживания и кабель-заправочные башни. Предложены подходы к оценке влияния размещения дополнительного оборудования на башнеподобных агрегатах на массу и стоимость этих агрегатов на ранних этапах проектирования наземного оборудования космических ракетных комплексов. Методики проведения таких оценок необходимы для обоснованного распределения функций между агрегатами наземного оборудования, что актуально для вновь создаваемых космических ракетных комплексов, особенно сверхтяжелого класса. В качестве допущения в работе принято сохранение постоянным внешних размеров несущих конструкций рассматриваемых агрегатов. В результате анализа напряженно-деформированного состояния стержневой модели башнеподобного агрегата получена приближенная зависимость для определения возрастания массы ферменной несущей конструкции башнеподобных агрегатов при размещении на них дополнительного оборудования. Проведен также анализ зависимости массы свайных фундаментов, типичных для башнеподобных агрегатов наземного оборудования, от изменения массы этих агрегатов. При этом принимались допущения о сохранении поперечных размеров фундаментов и однородности грунтовых условий. С помощью метода эквивалентной сваи (опоры) показано, что при использовании фундамента башнеподобного агрегата из свайных свай масса этого фундамента в первом приближении должна возрастать примерно пропорционально квадрату массы такого агрегата. Аналогично показано, что масса фундамента из свай-стоек должна возрастать примерно пропорционально массе башнеподобного агрегата. Полученные зависимости позволяют при наличии минимального объема исходных данных получить оценки изменения массы наземной и подземной частей башнеподобных агрегатов. Представлена также оценка соответствующего изменения стоимости башнеподобных агрегатов.

Ключевые слова: агрегат обслуживания ракеты космического назначения, башня обслуживания ракеты космического назначения, агрегат посадки и эвакуации экипажа, мобильная башня обслуживания, кабель-заправочная башня, космический ракетный комплекс сверхтяжелого класса

Введение. Планируемое создание на космодроме «Восточный» наземной инфраструктуры для новых космических ракетных комплексов (КРК), в том числе сверхлегкого и сверхтяжелого классов [1], осложняется в настоящее время тем, что имеется только ограниченный и отчасти устаревший опыт проектирования агрегатов наземного оборудования КРК этих типов. Применение новых принципов разработки стартовых комплексов позволит уменьшить

капитальные затраты [2]. Кроме того, потребуется внедрять, в том числе, и ранее не использовавшиеся технические решения.

В таких условиях при проектировании объектов наземной инфраструктуры, не имеющих близких аналогов, необходимо делать научно-обоснованный выбор технологии подготовки соответствующих ракет космического назначения (РКН) с учетом современного уровня развития науки и техники, а также на ранних этапах проектирования решать вопросы рационального распределения функций между агрегатами наземного оборудования. Отсутствие возможности подробно прорабатывать соответствующие системы и агрегаты на ранних этапах проектирования делает актуальным создание методик приближенной оценки изменения параметров для различных агрегатов наземного оборудования в зависимости от выполняемых ими функций.

Одни из дорогостоящих агрегатов наземного оборудования КРК, особенно для РКН сверхтяжелого класса, — башнеподобные агрегаты (БА), в том числе высотные, горизонтальные размеры которых в несколько раз меньше вертикальных. К ним относятся башни обслуживания, включая мобильные башни обслуживания (МБО), кабель-заправочные башни, агрегаты посадки и эвакуации экипажа, а также ряд других агрегатов. Конструктивно к ним близки также некоторые здания и сооружения стартовых и технических комплексов, например, отдельные здания вертикальной сборки РКН.

При сравнении различных вариантов технологий подготовки к пуску РКН типичными являются случаи, когда на один и тот же БА возлагаются (или не возлагаются) различные дополнительные функции, что существенно влияет на массу и стоимость агрегата вследствие различной массы размещаемого на нем дополнительного оборудования. В состав такого оборудования могут входить, в частности, площадки обслуживания, грузоподъемные машины, элементы систем обеспечения температурного режима и заправки. В целом аналогичные по назначению МБО, используемые при подготовке к пуску РКН семейств «Союз» и «Союз-2» в Гвианском космическом центре и на космодроме Восточный, отличаются, помимо прочего, наличием или отсутствием функции установки космической головной части (КГЧ) соответственно.

Существующий опыт проектирования высотных зданий и сооружений типа башен может быть применен к БА лишь ограниченно. Так, в высотных зданиях, как правило, отсутствует тяжелое дополнительное оборудование, а их конструктивная схема в большинстве случаев включает нехарактерное для БА относительно малое отношение высоты этажей к их поперечным размерам. В башнях, применяемых, например, в качестве опор линий электропередачи или антенных систем, как правило, существенно ослаблены требования

к допустимым перемещениям их конструкций, что оказывает значительное влияние на принимаемые конструктивные решения.

Цель работы — провести оценку влияния дополнительного оборудования на массу и стоимость БА наземного оборудования КРК, включая их фундаменты, на ранних этапах проектирования этих агрегатов. В качестве допущения принято, что внешние размеры наземной части БА, за исключением навесного оборудования типа площадок обслуживания, не изменяются. При этом не рассматриваются случаи, когда для обеспечения устойчивости БА используются растяжки или подкосы, сопоставимые по размерам с высотой БА.

Выбор расчетного случая. Поскольку выполнение операций подъема и опускания различных грузов, например КГЧ, может быть разрешено только при ограниченной скорости ветра, наиболее опасным расчетным случаем для БА, как правило, будет воздействие порыва ветра предельного значения в сочетании с нагрузками, постоянно действующими на конструкции БА. Подъем грузов и стоянка с поднятым грузом могут быть приведены к этому же случаю, если нагрузка от поднимаемого или подвешенного груза будет рассматриваться как постоянная. Кроме того, в зависимости от особенностей климата в сочетании с предельным значением ветра представляется опасным также и обледенение конструкций, но тогда и нагрузку ото льда можно учитывать как постоянную.

Таким образом, особенность БА заключается в том, что наиболее опасна климатическая, прежде всего, ветровая нагрузка, что соответствует имеющемуся опыту проектирования высотных зданий и сооружений [3]. При этом инерционная составляющая ветровой нагрузки будет зависеть от изгибных колебаний БА даже в случае, когда из-за особенностей конструкции их форма не будет соответствовать низшей собственной частоте.

Оценка изменения массы несущих конструкций наземной части БА. Башнеподобный агрегат, находящийся под ветровыми нагрузками предельного значения и веса, можно рассматривать в первом приближении как стержень, подвергающийся продольно-поперечному изгибу, что практикуется и для исследования конструкций металлических башен иного назначения [4, с. 510]. Следует отметить, что из-за относительно малой жесткости на изгиб БА не может нести существенную внеосевую нагрузку от веса какого-нибудь оборудования без использования либо подкосов, либо растяжек, либо противовесов, превращающих внеосевую нагрузку почти в осевую. При этом действие изгибающего момента от возможного внеосевого размещения нагрузки может быть учтено совместно с изгибающими силами от ветровой нагрузки (рис. 1, *а*). Аналогично может быть учтено и изменение максимальной ветровой нагрузки (рис. 1, *б*) при размещении или удалении выступающего за контур сооружения

дополнительного оборудования, например, площадок обслуживания. Поэтому далее проанализируем в первую очередь более сложное влияние осевой нагрузки от сил веса (рис. 1, в). При этом будем считать, что дополнительная нагрузка приложена к верхнему торцу сооружения, поскольку в случае необходимости приложить ее в другом месте или распределить ее по сооружению, она может быть приведена к торцевой нагрузке по эквивалентному влиянию на критическое значение сжимающей нагрузки.

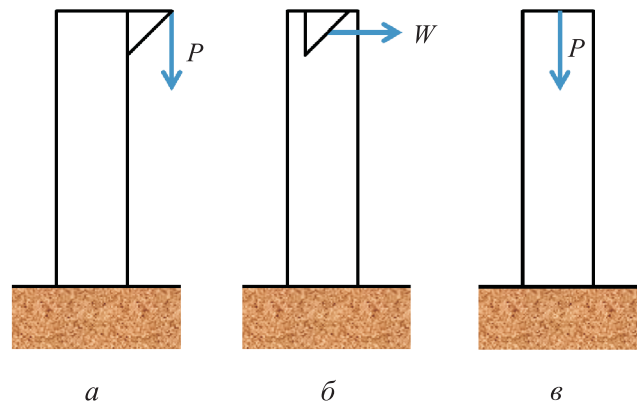


Рис. 1. Варианты приложения нагрузок от дополнительного оборудования на башнеподобный агрегат:

a — внеосевая нагрузка; *б* — нагрузка от ветрового воздействия на дополнительное оборудование; *в* — осевая нагрузка; *P* — весовая нагрузка; *W* — ветровая нагрузка

Согласно ранее проведенным исследованиям [5], влияние сжатия консольного стержня, нагруженного поперечной нагрузкой, на поперечное перемещение его свободного конца можно оценивать по зависимости

$$\delta = f_{W_0} / \left(1 - \frac{F_0}{F_{\text{крит } 0}} \right),$$

где f_{W_0} — поперечное перемещение характерной точки стержня (в данном случае — верхней точки БА) только под действием поперечной нагрузки, обусловленной в данном случае предельным ветром и несимметричным размещением грузов; F_0 , $F_{\text{крит } 0}$ — действующее и критическое значения сжимающей нагрузки, обусловленной в данном случае весом БА и расположенных на нем грузов.

В отличие от башен и мачт используемых, например, для линий электропередачи или крупногабаритных антенн, для БА наземного оборудования КРК из-за наличия лифтового и другого оборудования, а также обслуживающего персонала задаются жесткие требования

по крену сооружения. Поэтому для БА, как и для высотных зданий, обычно основным является расчет по допустимым перемещениям, при соблюдении которых также обеспечивается прочность БА. Вследствие этого в качестве оценочного критерия достаточности усиления конструкции БА при размещении на нем дополнительного оборудования можно принять постоянство поперечного перемещения верхней точки БА при предельном ветре. В этом случае имеет место соотношение

$$f_{W_0} / \left(1 - \frac{F_0}{F_{\text{крит}0}} \right) = f_W / \left(1 - \frac{F}{F_{\text{крит}}} \right), \quad (1)$$

где f_W — поперечное перемещение верхней точки БА под действием ветровой нагрузки от предельного ветра и момента от внецентренного размещения грузов при наличии дополнительного оборудования; F , $F_{\text{крит}}$ — действующее и критическое значения сжимающей нагрузки, обусловленной весом БА и расположенных на нем грузов при наличии дополнительного оборудования.

Зависимость (1) может быть переписана в виде

$$\frac{F_{\text{крит}0} - F_0}{F_{\text{крит}} - F} = \frac{f_{W_0} F_{\text{крит}0}}{f_W F_{\text{крит}}}. \quad (2)$$

С учетом принятого допущения о том, что поперечное сечение корпуса БА остается без изменений, усиление конструкции БА должно проводиться с применением более массивных профилей для металлоконструкций. Это допущение позволяет считать нагрузку от ветра практически постоянной с точностью до инерционных составляющих, которые, как показал специальный анализ с использованием результатов работы [6], будут изменяться незначительно.

В этом случае имеет место соотношение

$$\frac{f_{W_0}}{f_W} = \frac{J_{\text{min}}}{J_{\text{min}0}}, \quad (3)$$

где $J_{\text{min}0}$, J_{min} — минимальные моменты инерции сечения корпуса БА при изгибе под действием ветровой нагрузки без дополнительного оборудования и при его наличии.

В случае переменных сечений корпуса БА или используемых в нем профилей минимальные моменты инерции могут быть определены в первом приближении как эквивалентные в расчете на перемещение верхнего торца для стержня той же длины.

Аналогично для критической силы, приведенной к верхней точке БА постоянного сечения, будет иметь место соотношение

$$\frac{F_{\text{крит}0}}{F_{\text{крит}}} = \frac{J_{\text{min}0}}{J_{\text{min}}}. \quad (4)$$

Подставив соотношения (3) и (4) в (2), получим

$$\frac{F_{\text{крит}0} - F_0}{F_{\text{крит}} - F} = 1$$

или после соответствующих преобразований:

$$F_{\text{крит}} - F_{\text{крит}0} = F - F_0. \quad (5)$$

В первом приближении пренебрежем влиянием на нагрузку увеличившейся массы несущих конструкций БА. Тогда будет иметь место следующая зависимость:

$$F - F_0 = mg, \quad (6)$$

где m — масса дополнительного оборудования; g — ускорение свободного падения.

Из зависимостей (5) и (6) непосредственно следует, что

$$F_{\text{крит}} - F_{\text{крит}0} = mg.$$

Отметим, что при характерных для БА относительно больших сечениях стержней ферменных конструкций, обусловленных требованиями к их жесткости, как правило, обеспечивается и достаточная устойчивость этих стержней при работе на сжатие. Кроме того, отдельные элементы конструкций работают преимущественно на растяжение-сжатие. Поэтому при необходимости увеличить критическую силу рационально будет пропорционально повышенной приведенной нагрузке увеличить площадь поперечных сечений всех стержней ферменной конструкции.

Считая в первом приближении коэффициент приведения длины $\mu = 2$ (консольная балка), получим:

$$\frac{4\pi^2 EJ_{\text{min}}}{h^2} - \frac{4\pi^2 EJ_{\text{min}0}}{h^2} = mg, \quad (7)$$

где E — модуль упругости стали; h — расчетная высота БА.

В практически важном случае, когда момент инерции сечения БА определяется балками, расположенными на его противоположных сторонах, с учетом не работающей на восприятие вертикальных нагрузок заполняющей решетки ферменной конструкции [4, с. 510], соответствующие моменты инерции будут рассчитываться по приближенным соотношениям:

$$J_{\min 0} = \frac{S_0 b^2}{4},$$

$$J_{\min} = \frac{S b^2}{4},$$

где S_0, S — площади сечения основных балок без дополнительного оборудования и при его наличии; b — расчетная ширина БА по колоннам каркаса.

Соответственно, зависимость (7) может быть записана в виде

$$S - S_0 = \frac{mgh^2}{4\pi^2 b^2 E}.$$

Если конструкции имеют плотность ρ , а отношение массы заполняющей решетки ферменной конструкции к массе ее основных балок k , то дополнительная масса конструкции БА в первом приближении составит

$$M_1 = (S - S_0) k h \rho = \frac{m k \rho g h^3}{4\pi^2 b^2 E} = A m,$$

где

$$A = \frac{k \rho g h^3}{4\pi^2 b^2 E}.$$

С учетом имеющихся для плоских ферм рекомендаций [7, с. 239] о том, что наиболее совершенными по массе являются фермы с $k \approx 1$, для пространственных ферменных конструкций БА типичное значение k будет составлять 2 и более в зависимости от особенностей используемых решеток.

Влияние возросшей массы конструкции БА на его устойчивость можно учесть с помощью приведения сил веса к точке приложения нагрузки. Как показано в [8], коэффициент приведения для равномерно распределенной по сжатому консольно закрепленному стержню нагрузки к его свободному концу при расчете устойчивости составляет 0,3. Вследствие этого дополнительная масса от усиления конструкций БА при расчете на его устойчивость в первом приближении составит

$$\Delta M_{к1}^{\text{прив}} = 0,3 A m.$$

Однако учет этой дополнительной нагрузки, в свою очередь, потребует нового усиления несущих конструкций БА. В итоге дополнительная масса конструкции БА будет определяться как сумма

бесконечного ряда в виде геометрической прогрессии, сходящейся при условии $0,3A < 1$ [9, с. 572]:

$$M = mA \left(1 + 0,3A + (0,3A)^2 + \dots \right) = mA \sum_{n=1}^{\infty} (0,3A)^{n-1} = \frac{mA}{1-0,3A}.$$

Полное изменение массы наземной части БА, которое необходимо знать для оценки изменения стоимости фундамента БА, в этом случае составит

$$\Delta M_{\text{наз}} = m \left(1 + \frac{A}{1-0,3A} \right) = m \frac{1+0,7A}{1-0,3A}.$$

Оценка изменения стоимости фундамента. Стоимость устройства оснований и фундамента может достигать 20 % и более от затрат на строительство зданий и сооружений [10, с. 578]. Эта стоимость повышается с увеличением высоты зданий и сооружений, а также она существенно зависит от грунтовых условий. Так, в г. Хошимин (Вьетнам), для которого характерны сложные грунтовые условия, стоимость фундамента зданий от 8 до 30 этажей достигает 30...40 % общей стоимости строительства (причем в их числе стоимость свай составляет 22...30 %) [11, с. 3]. В случае создания фундамента специального пути для движения МБО в зависимости от его длины, грунтовых условий и параметров МБО стоимость устройства фундамента может превысить стоимость самой МБО. Поэтому следует также учитывать изменение стоимости устройства оснований и фундамента БА при изменении их параметров.

Для БА, особенно высотных, характерна малая площадь основания при относительно большой нагрузке, что, как правило, приводит к необходимости использования свайных фундамента ввиду недостаточной несущей способности основания; это относится и к фундаментам под путями МБО.

При этом в случае отсутствия на относительно небольшой глубине достаточно прочных для восприятия требуемых нагрузок скальных грунтов следует применять фундаменты с висячими сваями, которые не доходят до слоев грунта с высокой прочностью. Такие условия отмечаются, в частности, в наиболее актуальном для создания новых БА районе расположения космодрома Восточный, для которого характерно наличие нескальных суглинисто-песчаных грунтов [12, с. 428]. В связи с этим рассмотрим сначала фундаменты с висячими сваями.

Проектирование фундамента обычно не отделяется от проектирования основания — массива грунта, взаимодействующего с сооружением. Однако для свайных фундамента искусственные и усиленные основания чаще всего не используются, поэтому далее будут

рассматриваться только сами фундаменты. Кроме того, исследование будет ограничено применяемыми на практике для зданий и сооружений типа БА, не имеющими развитой стилобатной части, свайными фундаментами со сваями одинаковой длины.

Заранее учтенная при проектировании величина средней (или максимальной) осадки БА не оказывает существенного влияния на их работоспособность. Однако случайные изменения физических свойств грунта могут приводить к неравномерной осадке, вызывающей возникновение крена БА. Именно обеспечение неперевышения допустимых значений крена фундамента, как правило, является ключевым критерием при расчете фундаментов высотных зданий [13] и сооружений, что в полной мере относится и к БА.

Результаты многочисленных исследований [13] показывают, что опасная неравномерная осадка, приводящая к крену высотных зданий и сооружений, прямо пропорциональна их общей осадке. В связи с этим при расчетах оснований и фундаментов таких зданий и сооружений ограничению подлежит именно величина общей осадки. Причем чем выше здание или сооружение, тем меньше будет допустимая осадка его фундаментов исходя из условия ограничения крена [13, 14].

Следует отметить, что в России имеется значительный опыт проектирования фундаментов высотных зданий и сооружений, связанный как с историческими достижениями, так и со строительством большого числа высотных зданий в последние годы [14]. Это обусловило наличие в отечественной литературе большого количества апробированных методик расчета фундаментов, приспособленных для использования в различных ситуациях, в том числе и на ранних этапах проектирования с ограниченным объемом исходных данных.

Расчет свайных фундаментов, в том числе для БА, на осадку в нескальных грунтах может проводиться несколькими методами [15, с. 3; 16]. Для рассматриваемого случая оценочных расчетов неприменимы такие методы, которые основаны на использовании подробных исходных данных о конструкции фундамента. Поэтому наиболее рациональным будет применение приближенных методов. В то же время эмпирические методы также должны быть исключены из рассмотрения как наименее надежные. Для случая БА, для которых характерно использование глубоких свай при относительно малом размере фундамента в плане (для МБО — работающей в данном случае части фундамента специального пути), из оставшихся методов расчета наиболее подходит малораспространенный в отечественной практике метод эквивалентной сваи (опоры) [17]. Согласно этому методу, группа свай фундамента объединяется в одну эквивалентную сваю (рис. 2), чьи физические свойства определяются также с учетом грунтового массива, в котором они располагаются.

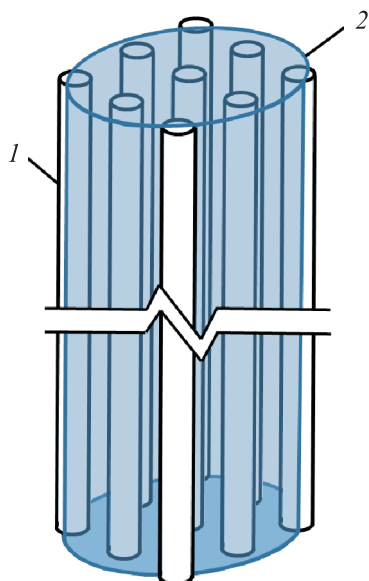


Рис. 2. Схема объединения всех свай фундамента башнеподобного агрегата в методе эквивалентной сваи:

1 — висячие сваи фундамента БА;
2 — эквивалентная свая

Критерием допустимости использования метода эквивалентной сваи является параметр [16, с. 31–32]

$$R = \sqrt{\frac{na}{l}},$$

где n — число свай в фундаменте; a — шаг между сваями; l — длина свай.

Согласно рекомендациям, изложенным в [16, с. 32], применение различных реализаций метода эквивалентной сваи рационально при $R < 2$ или $R < 4$. При значениях $R > 4$ для расчета свайных фундаментов предлагается применять метод эквивалентного фундамента.

Приведенный диаметр эквивалентной сваи [17]

$$d_{eq} = 1,13...1,27\sqrt{Ag}, \quad (8)$$

где Ag — площадь свайной группы, меньшее значение численного коэффициента соответствует сваям-стойкам, передающим нагрузку на основание только по нижнему концу, а большее — чисто висячим сваям, передающим нагрузку в основном в результате трения на боковой поверхности.

Анализ зависимости (8) показывает, что при сохранении размеров фундамента в плане диаметр эквивалентной сваи остается постоянным независимо от нагрузки, а с изменением размера фундамента — изменяется прямо пропорционально изменению каждого из его поперечных размеров. Здесь следует иметь в виду, что иногда БА наземного оборудования КРК проектируют с фундаментами как меньшего, так и большего, чем сами БА, сечения. Это видно по конструкции нижних

частей этих БА, например, в случае кабель-заправочных башен КРК «Ангара» на космодромах Плесецк и Восточный соответственно.

Осадка одиночной сваи согласно [18] оценивается по зависимости

$$s = \beta \frac{N}{G_1 l},$$

где β — коэффициент пропорциональности; N — нагрузка на сваю; G_1 — модуль сдвига в прорезаемом слое грунта.

Учитывая, что для достаточно жестких свай коэффициент β слабо (логарифмически) зависит от их длины, для сохранения прежней осадки эквивалентной сваи при увеличении нагрузки N в k_f раз требуется практически прямо пропорционально увеличивать длину свай фундамента l . При этом очевидно, что не учтенная малая часть осадки в результате сжатия самих свай и массива грунта между ними должна в меньшей степени влиять рассматриваемую в данном случае неравномерность осадки БА вследствие гарантированного совпадения свойств материала и размеров свай всего фундамента при качественном их изготовлении.

Следует также отметить, что оценка необходимого увеличения длины свай по методу эквивалентного фундамента в модификации, допускаемой в настоящее время при расчете оснований опор мостов [18, п. 7.4.9], а ранее широко применявшейся и при расчете всех свайных фундаментов [19, п. 6.1], дает аналогичный результат. При этом получение соответствующей оценки с использованием основного рекомендуемого в настоящее время варианта метода эквивалентного фундамента [18] сильно затруднено вследствие особенностей этого метода.

Помимо необходимости обеспечения требований по осадке при увеличении нагрузки на фундаменты следует обеспечивать прочность самих фундаментов и взаимодействующего с ними основания. При этом увеличение поперечных размеров свай при уменьшении их количества положительно влияет на прочность конструкции, но отрицательно — на несущую способность поверхности их контакта с грунтом основания, поэтому существуют оптимальные значения этих поперечных размеров. Вследствие этого при возрастании нагрузки на фундамент можно прямо пропорционально увеличить количество используемых свай при сохранении их поперечных размеров и площади размещения, что гарантирует сохранение прочности как самих свай, так и поверхности их контакта с грунтовым основанием. Соответственно, при увеличении нагрузки на фундамент в k_f раз во столько же раз необходимо увеличить и количество свай.

Таким образом, с повышением нагрузки на фундамент при сохранении его размеров и схемы в плане для обеспечения прочности

фундамента следует увеличивать количество свай, а для сохранения той же осадки при использовании висячих свай придется увеличить их длину. С учетом приведенных выше оценок, с увеличением нагрузки от надземной части БА в k_ϕ раз, масса и, как правило, стоимость свайного фундамента, обеспечивающего ту же осадку, возрастает приблизительно в k_ϕ^2 раз.

При наличии в фундаменте БА двух обособленных групп свай, что характерно, например, для кабель-заправочных башен КРК «Ангара», целесообразно их рассматривать как две отдельные эквивалентные сваи. В этом случае они будут оказывать воздействие друг на друга через массив грунта, вызывая дополнительную осадку, определяемую [18] по зависимости

$$s_{ad} = \delta \frac{N}{G_1 l},$$

где δ — коэффициент пропорциональности.

В рассматриваемом случае относительно близкого расположения эквивалентных свай коэффициент пропорциональности δ будет слабо (логарифмически) возрастать с увеличением длины свай [18], чем в первом приближении при условии относительно небольшой разницы масс сравниваемых БА можно пренебречь. Применительно к взаимному влиянию фундаментов соседних БА следует также отметить, что при относительно больших расстояниях между ними коэффициент пропорциональности δ принимается равным нулю, т. е. взаимное влияние фундаментов не учитывается.

При наличии на небольшой глубине достаточно прочных для восприятия нагрузок от рассматриваемого БА скальных грунтов возможно применение фундаментов, глубину заложения которых практически не требуется увеличивать с повышением нагрузки на фундамент, например свай-стоек. Тогда масса и стоимость фундаментов должны увеличиваться практически прямо пропорционально нагрузке на них. Такая ситуация могла бы иметь место, например, в случае базальтовых скальных грунтов, характерных для Ванинского района Хабаровского края, где ранее рассматривалась возможность строительства космодрома [12, с. 426].

Оценка изменения стоимости БА в целом. Изменение стоимости БА можно рассматривать как сумму изменения стоимости его отдельных частей:

- стоимость дополнительного оборудования и его монтажа можно определить прямой калькуляцией;
- повышение стоимости конструкции можно рассчитать по стоимости изготовления и монтажа единицы массы металлоконструкций;

• повышение стоимости фундаментов можно определить по нормативам на увеличение объема работ и применяемых материалов, но при этом требуется знать массу БА без дополнительного оборудования и, желательно, стоимость его фундаментов.

Обсуждение полученных результатов. Полученные результаты исследования позволяют при минимальном количестве данных проводить достаточно обоснованное сравнение различных вариантов исполнения БА в зависимости от возлагаемых на них функций, используя разную технологию подготовки к пуску РКН, в значительной части практически важных случаев. В то же время за пределами рассмотрения данной статьи остались такие случаи, когда изменяются поперечные размеры и высота БА, а также случаи, когда конструктивная схема БА существенно отличается от консольного стержня, что имеет место, в частности, при применении подкосов, сопоставимых по размеру с самими БА.

Заключение. По полученным результатам можно сделать следующие выводы.

1. Показана возможность выполнить оценку увеличения массы конструкции наземной части БА при размещении дополнительного оборудования в верхней его части.

2. Проанализированы необходимые изменения конструкции характерных для БА наземного оборудования КРК фундаментов из висячих свай при изменении массы наземной части БА, позволяющие провести оценку соответствующего изменения массы и стоимости фундаментов БА.

3. Приведена оценочная зависимость изменения параметров фундаментов БА наземного оборудования КРК от массы БА для случая, когда отмечается наличие скальных грунтов на относительно небольшой глубине, достаточно прочных для восприятия нагрузок от рассматриваемого БА.

4. Рассмотрена возможность оценки изменения стоимости БА в целом при размещении на нем дополнительного оборудования.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Рогозин заявил, что стройка Восточного не закончится никогда. *РИА Новости*. 25.01.2022. URL: <https://realty.ria.ru/20220125/rogozin-1769451524.html> (дата обращения 31.01.2022).
- [2] Новая инфраструктура космодрома Восточный не выдержит ядерный удар. *Интерфакс*. 24.01.2022 URL: <https://www.interfax.ru/russia/817961> (дата обращения 31.01.2022).
- [3] Карамышева А.А., Аракелян А.А., Иванов Н.В., Коняхин В.О., Гранкина Д.В. Обеспечение устойчивости высотных уникальных зданий. Архитектурно-планировочные и конструктивные решения. *Инженерный вестник Дона*, 2018, № 4. URL: http://ivdon.ru/uploads/article/pdf/IVD_52_Karamysheva_Arakelyan.pdf_0bb3622e90.pdf (дата обращения 07.02.2022).

- [4] Беленя Е.И., ред. *Металлические конструкции*. 6-е изд. Москва, Стройиздат, 1986, 560 с.
- [5] Колоколов С.Б., Соколов В.С. К вопросу об оценке работоспособности сжато-изогнутых стержней. *Вестник Оренбургского государственного университета*, 2006, № 6–2, с. 181–184. URL: http://vestnik.osu.ru/2006_6/64.pdf (дата обращения 13.05.2022).
- [6] Лаврович Н.И. Собственные частоты колебания стержней. *Омский научный вестник*, 2000, № 13, с. 106–108.
- [7] Васильев А.А. *Металлические конструкции*. 3-е изд. Москва, Стройиздат, 1979, 472 с.
- [8] Вольмир А.С. *Устойчивость деформируемых систем*. 2-е изд. Москва, Наука. Гл. ред. физ.-мат. лит.-ры, 1967, 984 с.
- [9] Выгодский М.Я. *Справочник по высшей математике*. 12-е изд. Москва, Наука. Гл. ред. физ.-мат. лит.-ры, 1967, 872 с.
- [10] Ягупов Б.А. *Строительные конструкции. Основания и фундаменты*. Москва, Стройиздат, 1991, 671 с.
- [11] Нгуен К.Х. *Методика выбора оптимальных фундаментов высотных зданий в условиях г. Хошимина. Автореф. дис. ... канд. техн. наук*. Санкт-Петербург, 2008, 19 с.
- [12] *История развития отечественной наземной ракетно-космической инфраструктуры*. Москва, Издат. дом «Столичная энциклопедия», 2017, 504 с.
- [13] Базезин Р.Л., Шулятьев О.А., Шулятьев С.О., Буслов А.С. Выявление критериев, определяющих ограничение деформаций оснований фундаментов высотных зданий. *Вестник НИЦ «Строительство»*, 2021, № 29 (2), с. 13–27. DOI: 10.37538/2224-9494-2021-2(29)-13-27
- [14] Шулятьев О.А. *Основания и фундаменты высотных зданий*. Москва, Изд-во АСВ, 2020, 442 с.
- [15] *Методические указания по расчету осадок вертикально-нагруженных свай групп с учетом их взаимного влияния*. Москва, 2020, 51 с. URL: https://www.faufcc.ru/upload/methodical_materials/mp09_2020.pdf (дата обращения 11.02.2022).
- [16] Боков И.А. *Расчет осадок свайных фундаментов со сваями различной длины. Дис. ... канд. техн. наук*. Москва, 2020, 150 с.
- [17] Боков И.Л. Расчет осадки свайного фундамента по модели эквивалентной сваи с применением решений метода коэффициентов взаимного влияния. *Вестник НИЦ «Строительство»*, 2019, т. 23, № 4, с. 50–59.
- [18] *СП 24.13330.2021 Свайные фундаменты*. Москва, 2021, 94 с.
- [19] *СНиП 2.02.03-85 Свайные фундаменты*. Москва, 1995, 47 с.

Статья поступила в редакцию 08.09.2022

Ссылку на эту статью просим оформлять следующим образом:

Игрицкий В.А. Влияние дополнительного оборудования на параметры несущих конструкций башнеподобных агрегатов космических ракетных комплексов. *Инженерный журнал: наука и инновации*, 2022, вып. 9.

<http://dx.doi.org/10.18698/2308-6033-2022-9-2213>

Игрицкий Владимир Александрович — канд. техн. наук, доцент кафедры «Стартовые ракетные комплексы» МГТУ им. Н.Э. Баумана. Области научных интересов: наземное оборудование ракетно-космической техники, космические аппараты и образовательные космические технологии. e-mail: igrisky_v_a@bmstu.ru

Additional equipment impact on the parameters of the load-bearing structures of tower-like aggregates of the space rocket complexes

© V.A. Igritsky

Bauman Moscow State Technical University, Moscow, 105005, Russia

Various tower-like aggregates are often used as part of the space rocket system ground equipment, for example, mobile service towers and cable-filling towers. The impact of placing additional equipment on the tower-like aggregates on the mass and the cost of these aggregates were assessed at the early stages of the ground equipment design and development for the space rocket systems. Methods for conducting such assessments are required for reasonable function distribution among the ground equipment aggregates, which is relevant for the newly created space rocket systems, especially those of the super-heavy class. Constant external dimensions of the supporting structures of the aggregates under consideration were considered as an assumption in the work. As a result of analyzing the stress-strain state of the tower-like aggregate rod model, an approximate dependence was obtained to identify the increase in the mass of a truss supporting structure of the tower-like aggregates with additional equipment loaded on them. Besides, dependence of the pile foundation mass typical for the tower-like aggregates of ground equipment on alteration in the mass of such aggregates was analyzed. At the same time, assumptions were accepted on maintaining the foundation transverse dimensions and the soil conditions uniformity. The equivalent pile (support) method shows that when using the tower-like aggregate foundation containing the hanging piles, this foundation mass in the first approximation should increase circa in proportion to the square of the mass of the tower-like aggregate. Similarly, it was demonstrated that the mass of pile-racks foundation should increase approximately in proportion to the mass of the tower-like aggregate. The dependences obtained make it possible in the presence of a minimum amount of the initial data to obtain estimates of alterations in the mass of the tower-like aggregate ground and underground components. An estimate of the corresponding alteration in the tower-like aggregate cost is also provided.

Keywords: *space rocket service aggregate, space rocket service tower, crew landing and evacuation aggregate, mobile service tower, cable-filling tower, super-heavy class space rocket complex*

REFERENCES

- [1] Rogozin zayavil, chto strojka Vostochnogo ne zakonchitsya nikogda [Rogozin stated that Vostochny construction will never end]. *RIA Novosti*. Available at: <https://realty.ria.ru/20220125/rogozin-1769451524.html> (accessed January 31, 2022).
- [2] Novaya infrastruktura kosmodroma Vostochnyj ne vyderzhit yaderny udar [Vostochny cosmodrome infrastructure will not survive a nuclear blow]. *Interfax*. 24.01.2022. Available at: <https://www.interfax.ru/russia/817961> (accessed January 31, 2022).
- [3] Karamysheva A.A., Arakelyan A.A., Ivanov N.V., Konyahin V.O., Grankina D.V. Obespechenie ustoychivosti vysotnykh unikalnykh zdaniy. Arhitekturno-planirovochnye i konstruktivnye resheniya [Ensuring sustainability of unique high-rise buildings. Architectural, planning and construction solutions]. *Inzhenerny vestnik Dona — Engineering journal of Don*, 2018, no. 4. Available at:

- http://ivdon.ru/uploads/article/pdf/IVD_52_Karamysheva_Arakelyan.pdf_0bb3622e90.pdf (accessed February 7, 2022).
- [4] Belenya E.I., ed. *Metallicheskie konstruksii* [Metallic structures]. 6th edition. Moscow, Stroyizdat Publ., 1986, 560 p.
- [5] Kolokolov S.B., Sokolov V.S. K voprosu ob otsenke rabotosposobnosti szhatykh sterzhney [On the issue of evaluating the compressed-bent bar performance]. *Vestnik Orenburgskogo gosudarstvennogo universiteta (Bulletin of the Orenburg State University)*, 2006, no. 6–2, pp. 181–184. Available at: http://vestnik.osu.ru/2006_6/64.pdf (accessed May 13, 2022).
- [6] Lavrovich N.I. Sobstvennye chastoty kolebaniya sterzhney [Natural frequencies of the rod oscillations]. *Omskiy nauchny vestnik — Omsk Scientific Bulletin*, 2000, no. 13, pp. 106–108.
- [7] Vasilyev A.A. *Metallicheskie konstruksii* [Metallic structures]. 3rd edition. Moscow, Stroyizdat Publ., 1979, 472 p.
- [8] Volmir A.S. *Ustoychivost deformiruemyykh sistem* [Sustainability of deformable systems]. 2nd edition. Moscow, Nauka Publ., Chief editorial board on physics and mathematics literature, 1967, 984 p.
- [9] Vygodskij M.Ya. *Spravochnik po vysshey matematike* [Reference book on higher mathematics]. 12th edition. Moscow, Nauka Publ., Chief editorial board on physics and mathematics literature, 1967, 872 p.
- [10] Yagupov B.A. *Stroitel'nye konstrukcii. Osnovaniya i fundamenty* [Building structures. Basement and foundations]. Moscow, Stroyizdat Publ., 1991, 671 p.
- [11] Nguen K.H. *Metodika vybora optimalnykh fundamentov vysotnykh zdaniy v usloviyakh g. Hoshimina* [Methods of selecting optimal foundations for high-rise buildings in the Ho Chi Min City]. *Avtoref. dis ... kand. tekhn. nauk* [Cand. Sc. (Eng.) Diss. Abstract]. St. Petersburg, 2008, 19 p.
- [12] *Istoriya razvitiya otechestvennoy nazemnoy raketno-kosmicheskoy infrastruktury* [History of development of the domestic land-based rocket and space infrastructure]. Moscow, Stolichnaya enciklopediya Publ., 2017, 504 p.
- [13] Balezin R.L., Shulyatyev O.A., Shulyatyev S.O., Buslov A.S. Vyyavlenie kriteriev, opredelyayushchikh ogranichenie deformatsiy osnovaniy fundamentov vysotnykh zdaniy [Identification of criteria that determine limits in deformation of the high-rise foundations basement]. *Vestnik NIC «Stroitelstvo» — Bulletin of the Stroitelstvo SRC*, 2021, no. 29 (2), pp. 13–27. DOI: 10.37538/2224-9494-2021-2(29)-13-27
- [14] Shulyatyev O.A. *Osnovaniya i fundamenty vysotnykh zdaniy* [Basements and foundations of the high-rise buildings]. Moscow, ASV Publ., 2020, 442 p.
- [15] *Metodicheskie ukazaniya po raschetu osadok vertikalno-nagruzhennykh svaynykh grupp s uchetom ikh vzaimnogo vliyaniya* [Methodical guidelines for calculation of the vertically loaded pile groups taking into account interaction thereof]. Moscow, 2020, 51 p. Available at: https://www.faufcc.ru/upload/methodical_materials/mp09_2020.pdf (accessed February 11, 2022).
- [16] Bokov I.A. *Raschet osadok svaynykh fundamentov so svayami razlichnoy dliny* [Calculation of the pile foundation settlement with piles of various length]. *Dis. ... cand. tekhn. nauk* [Cand. Sc. (Eng.) dissertation]. Moscow, 2020, 150 p.
- [17] Bokov I.L. Raschet osadki svajnogo fundamenta po modeli ekvivalentnoy svai s primeneniem resheniy metoda koeffitsientov vzaimnogo vliyaniya [Calculation of the foundation settlement according to the equivalent pile model using solutions of the mutual interference method]. *Vestnik NIC «Stroitelstvo» — Bulletin of the Stroitelstvo SRC*, 2019, vol. 23, no. 4, pp. 50–59.

- [18] *SP 24.13330.2021 Svajnye fundamenty* [Pile foundations]. Moscow, 2021, 94 p.
[19] *SNiP 2.02.03-85 Svajnye fundamenty* [Pile foundations]. Moscow, 1995, 47 p.

Igritsky V.A., Cand. Sc. (Eng.), Associate Professor, Department of Rocket Launching Complexes, Bauman Moscow State Technical University. Research interests: ground-based equipment of rocket and space technology, spacecraft and educational space technologies. e-mail: igritsky_v_a@bmstu.ru