

Оценка удобства обслуживания элементов ракет космического назначения сверхтяжелого класса при различных технологиях их подготовки

© В.А. Игрицкий

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

Новые космические ракетные комплексы с ракетами космического назначения (РКН) сверхтяжелого класса (СТК) создаются в России, США и Китае. Одной из отличительных особенностей РКН СТК и их элементов являются большие поперечные размеры, достигающие порядка 10 м в диаметре, что значительно превышает характерные поперечные размеры элементов РКН других классов. Это оказывает существенное влияние как на удобство обслуживания таких элементов при подготовке к пуску, так и на производительность, безопасность, надежность проведения соответствующих операций и РКН СТК в целом. На основе действующих российских государственных стандартов проанализирована эргономичность временных рабочих мест, используемых при обслуживании поверхностей элементов РКН, в зависимости от кривизны и ориентации поверхности обслуживаемого элемента. Для боковых поверхностей цилиндрических элементов РКН выполнено сравнение доли поверхностей, удобных и неудобных при использовании вертикальной и горизонтальной технологий подготовки и различных средств обслуживания. Показано, что при использовании неподвижных относительно элемента площадок обслуживания вертикальная технология подготовки становится более предпочтительной при диаметре элемента более 4,5 м. При этом вращение элемента в горизонтальном положении вокруг продольной оси при горизонтальной технологии подготовки или применение перемещаемых в вертикальном направлении площадок при вертикальной технологии подготовки позволяют обеспечить удобство обслуживания всей боковой поверхности цилиндрических элементов РКН. Рассмотрена возможность учета других поверхностей обслуживаемого элемента РКН для численной оценки удобства различных вариантов их подготовки.

Ключевые слова: обслуживание ракет космического назначения, ракета космического назначения сверхтяжелого класса, технология подготовки ракет космического назначения, удобство обслуживания ракет космического назначения, эргономика обслуживания ракет космического назначения

Введение. В мире проводятся работы по созданию ракет космического назначения (РКН) сверхтяжелого класса (СТК) [1–4]. Перспективные РКН СТК отличаются повышенной сложностью при очень высокой стоимости и ограниченной серийности производства [5, 6], что накладывает особо жесткие требования на обеспечение их надежности. В частности, именно недостаточная надежность стала одной из основных причин закрытия проекта отечественного ракетного комплекса Н-1 и, соответственно, всей отечественной лунной пилотируемой программы 1970-х годов [7, с. 190]. Поэтому при со-

здании космических ракетных комплексов (КРК) СТК обеспечению надежности необходимо уделять особое внимание.

В связи с возрастанием надежности технических систем все большее влияние на этот параметр объектов ракетно-космической техники начинает оказывать вероятность безотказной работы персонала, которая обеспечивается целым рядом технических и организационных мероприятий. Однако, как показывает наличие соответствующих аварийных ситуаций, ее повышение остается актуальным и в настоящее время.

Одним из путей повышения производительности, безопасности и надежности работы персонала при наземной подготовке РКН и их элементов является улучшение условий труда, поскольку при обеспечении требований эргономики рабочего места надежность работы персонала увеличивается [8]. Следует отметить, что наиболее интенсивные исследования в этом направлении до настоящего времени проводились в основном по отношению к космонавтам и летчикам [8, 9], а не к персоналу, обеспечивающему подготовку РКН.

Согласно действующим нормативам ГОСТ Р 54317–2011 (п. 4.4), рабочие места персонала, обслуживающего оборудование в положении сидя, должны удовлетворять требованиям ГОСТ 12.2.032–78, а в положении стоя — ГОСТ 12.2.033–78. Кроме того, п. 12.17 ГОСТ Р 54317–2011 предписано соблюдать при проектировании принципы конструирования устройств с учетом эргономических принципов, установленных ГОСТ 12.2.049. В п. 3.2. ГОСТ 12.2.049 указано, что «Рабочее место при выполнении работ в положении сидя должно соответствовать требованиям ГОСТ 12.2.032–78, в положении стоя — ГОСТ 12.2.033–78». На практике для временных рабочих мест при сборке и обслуживании РКН и их элементов эти требования часто не могут быть реализованы в полном объеме. Однако при разной ориентации обслуживаемых элементов и при использовании разного оборудования степень соблюдения этих требований может существенно варьироваться. При этом, несмотря на то что антропометрические показатели персонала могут колебаться в некоторых пределах, а рабочие позы могут иметь разную степень дискомфорта [10], нормативы, приведенные в указанных стандартах, позволяют получить некоторую оценку удобства проведения работ.

Существуют две технологии подготовки РКН и их элементов — в горизонтальном и вертикальном положении [11, с. 260]. Для относительно небольших РКН от легкого до тяжелого класса включительно сборка в горизонтальном положении обладает очевидными преимуществами в удобстве обслуживания и перевозки РКН. В результате этого ее применение в мире расширяется несмотря на отрицательное влияние на грузоподъемность РКН и возникновение дополнительных расчетных случаев для выводимой полезной нагрузки.

В то же время для перспективных КРК СТК из-за больших поперечных размеров ракет, которые могут достигать 10 м в диаметре [2–4], горизонтальная технология подготовки РКН может быть менее удобной, чем вертикальная. Актуальность этого вопроса возрастает в связи с проработкой в России проектов перспективных тяжелых грузовых самолетов «Слон» [12] и Ил-96-500Т [13], которые, судя по параметрам грузового отсека, смогут перевозить ракетные блоки увеличенного по сравнению с самолетом Ан-124 «Руслан» диаметра.

Цель настоящей статьи — получить численную оценку удобства обслуживания РКН и их элементов в зависимости от их размеров и ориентации в пространстве, а также типа технологического оборудования, используемого для доступа персонала к поверхности обслуживаемых изделий. Такая оценка может повлиять на решение актуальной проблемы выбора технологий подготовки перспективных РКН СТК.

Ранее результаты исследований автора по этому вопросу частично приводились в тезисах доклада конференции [14], но в настоящей публикации они значительно расширены и уточнены.

Эргономические требования действующих стандартов. Основные эргономические факторы, оказывающие влияние на удобство обслуживания изделий, — физическая достижимость соответствующей поверхности руками человека в комфортном положении, т. е. стоя или сидя, а также удобство видимости соответствующей поверхности из тех же положений. Удобство зрительного контроля определяется четырьмя факторами:

- 1) расчетной высотой линии взора, которая, по ГОСТ 12.2.033–78, в положении стоя составляет около 1530 мм и принимается такой в дальнейших расчетах;
- 2) углами обзора в вертикальной плоскости;
- 3) углом отклонения лицевой поверхности от линии взора, который не должен превышать 45°, по ГОСТ 23000–78 (рис. 1);
- 4) минимально допустимым расстоянием, на котором глаз способен нормально фокусироваться.

Однако, как показал соответствующий анализ, учет допустимого расстояния не влияет на последующие выводы, поэтому в дальнейших рассуждениях это ограничение рассматриваться не будет.

Зоны зрительного наблюдения в вертикальной плоскости по ГОСТ 12.2.032–78 и ГОСТ 12.2.033–78 не имеют собственных названий, поэтому в рамках настоящей статьи для упрощения последующего изложения по аналогии с зонами досягаемости моторного поля по ГОСТ 12.2.033–78 введены следующие обозначения зон зрительного наблюдения в вертикальной плоскости:

- 1) оптимальная зона зрительного наблюдения;
- 2) удобная зона зрительного наблюдения;
- 3) зона досягаемости зрительного наблюдения.

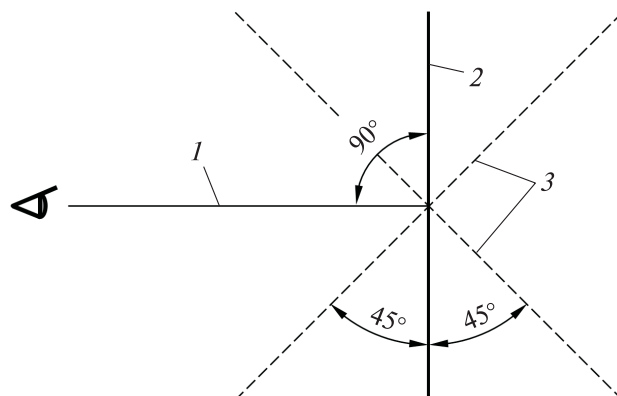


Рис. 1. Расположение лицевой поверхности средств отображения информации относительно линии зрения оператора и допустимый угол отклонения по ГОСТ 23000–78:

1 — линия зрения оператора; 2 — оптимальное расположение лицевой поверхности средств отображения информации (поверхности обслуживаемого элемента РКН); 3 — расположение лицевой поверхности средств отображения информации (поверхности обслуживаемого элемента РКН) при максимально допустимом угле отклонения

В первой зоне расположены очень часто используемые средства отображения информации, требующие точного и быстрого считывания показаний под углом $\pm 15^\circ$ от нормальной линии взгляда. Во второй зоне — часто используемые средства отображения информации, требующих менее точного и быстрого считывания показаний под углом $\pm 30^\circ$ от нормальной линии взгляда. В третьей зоне находятся редко используемые средства отображения информации под углом $\pm 60^\circ$ от нормальной линии взгляда, доступной только при одновременном движении глаз и повороте головы.

Зона досягаемости зрительного наблюдения при этом фактически указывает только предельно допустимые параметры рабочего места, поскольку для выполнения работы она требует поворота головы и не является удобной. В то же время ограничение рассмотрения только оптимальной зоной зрительного наблюдения представляется нерациональным, поскольку эта зона достаточно мала и может быть менее удобной для наблюдения для некоторых видов работ, например, с отверткой на вертикальной поверхности. Поэтому в дальнейшем в качестве удобных рассмотрены оптимальная и удобная зоны зрительного наблюдения.

Согласно ГОСТ 12.2.033–78, в котором высота плечевого сустава над уровнем пола составляет около 1300 мм, определены для положения стоя зоны досягаемости моторного поля и зрительного наблюдения в вертикальной плоскости. Максимальная удобная высота работы над уровнем пола составляет 1,65 м (рис. 2, а).

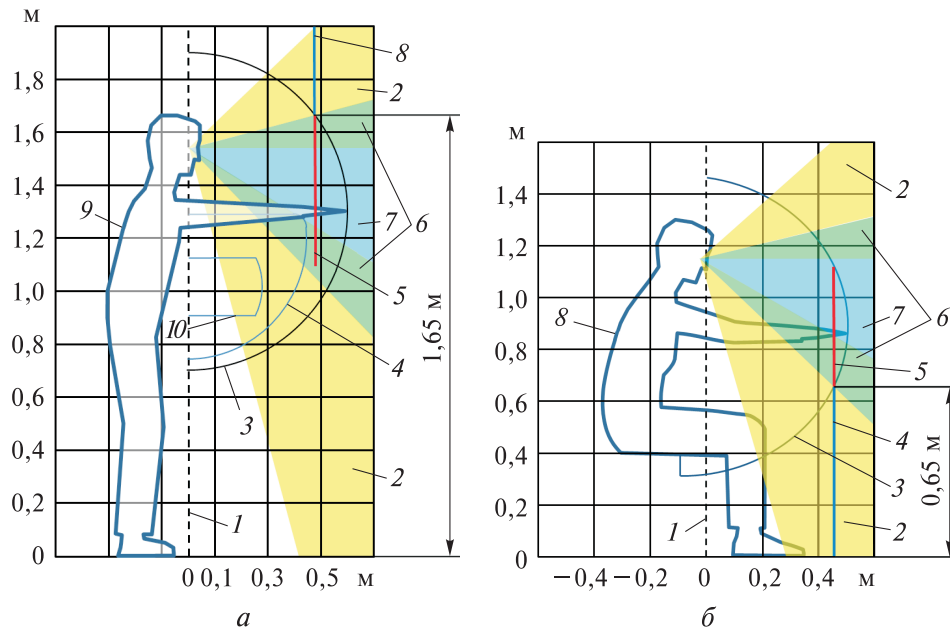


Рис. 2. Зоны досягаемости моторного поля и зрительного наблюдения в вертикальной плоскости по ГОСТ 12.2.033–78 (а) и ГОСТ 12.2.032–78 (б):

для а: 1 — край рабочей поверхности; 2 — зона досягаемости зрительного наблюдения; 3 — зона досягаемости моторного поля; 4 — зона легкой досягаемости моторного поля; 5, 8 — удобная и неудобная для работы части вертикальной поверхности соответственно; 6, 7 — удобная и оптимальная зоны зрительного наблюдения соответственно; 9 — положение тела работающего; 10 — оптимальная зона моторного поля;
 для б: 1 — край рабочей поверхности; 2 — зона досягаемости зрительного наблюдения; 3 — зона досягаемости моторного поля; 4, 5 — неудобная и удобная для работы части вертикальной поверхности соответственно; 6, 7 — удобная и оптимальная зоны зрительного наблюдения соответственно; 8 — положение тела работающего

На рис. 2, а видно, что оптимальная зона моторного поля частично перекрывается только наименее удобной из допустимых зон наблюдения, требующей поворота головы, что неудобно при длительной работе. Зона легкой досягаемости моторного поля лишь в небольшой своей части пересекается с менее удобной зоной наблюдения и практически в одной точке касается наиболее удобной зоны наблюдения. Кроме того, в ряде случаев применение специальных ручных инструментов позволяет использовать более удобные зоны моторного поля по сравнению с теми, в которых фактически находится место проведения работ. Поэтому при дальнейшем рассмотрении критерием удобства обслуживания с точки зрения досягаемости принимается нахождение места проведения работы в пределах зоны досягаемости моторного поля.

Согласно ГОСТ 12.2.032–78, для положения сидя показаны зоны досягаемости моторного поля и зрительного наблюдения в вертикальной плоскости, а также минимально достижимая высота удобной

работы на вертикальной поверхности, которая составляет 0,65 м и достигается именно в этом положении (рис. 2, б).

В настоящей статье в качестве меры удобства обслуживания элемента РКН принята доля площади его наружной поверхности, обслуживание которой с учетом используемого технологического оборудования является удобным с учетом наблюдаемости и досягаемости в положении стоя или сидя.

Удобство обслуживания вертикально ориентированных цилиндрических поверхностей. Для вертикально ориентированных цилиндрических и плоских поверхностей при наличии подвижных или переставных на всю высоту поверхности площадок обслуживания, находящихся применение в ракетно-космической технике [15, с. 199, с. 205], все 100 % площади поверхности могут быть сделаны удобными для обслуживания. Однако для экономии средств при обслуживании вертикальных поверхностей, в том числе и в ракетной технике, например, в подавляющем большинстве башен обслуживания РКН и зданиях вертикальной сборки, чаще всего используются неподвижные по высоте площадки, затрудняющие обслуживание той части поверхности, к которой они прилегают (рис. 3, а). В этом случае по ГОСТ 27321–2018 для приставных стоечных лесов, прямым аналогом которых являются площадки обслуживания элементов РКН, минимальная высота яруса (прохода) в свету должна составлять не менее 1,9 м. В этом случае всего на ярус приходится 2,0 м. Часто эти площадки, особенно на башнях обслуживания, размещаются с шагом, значительно превосходящим минимальный. Это дает возможность более удобного доступа при использовании временных средств подмащивания, но может существенно увеличить сложность доступа к частям поверхности, расположенным высоко над площадками.

Для промышленных зданий, согласно СП 56.13330.2011, высота в помещениях должна быть:

1) от пола до низа выступающих конструкций перекрытия (покрытия) — не менее 2,2 м;

2) от пола до низа выступающих частей коммуникаций и оборудования в местах регулярного прохода людей и на путях эвакуации — не менее 2 м;

3) в местах нерегулярного прохода людей — не менее 1,8 м.

Таким образом, даже с использованием средств подмащивания расстояние от пола до потолка нельзя уменьшить менее чем до 1,8 м, не нарушив соответствующих требований, связанных с возможностью получения травмы работающим при ударе головой о слишком низко расположенный потолок.

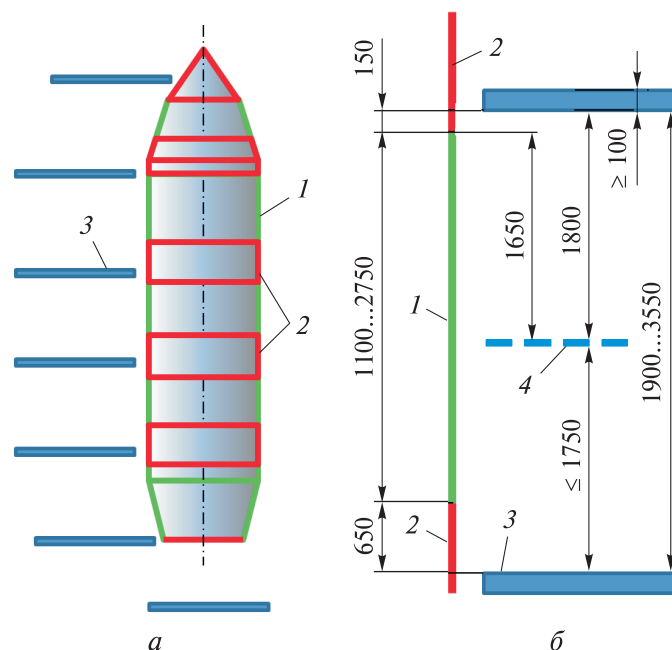


Рис. 3. Расчет удобства обслуживания вертикально ориентированных цилиндрических поверхностей:

а — использование неподвижных площадок для обслуживания установленного вертикально элемента РКН; *б* — расчетная схема для определения доли поверхности, удобной для обслуживания; *1* — удобная для обслуживания часть поверхности; *2* — неудобная для обслуживания часть поверхности; *3* — неподвижные площадки обслуживания; *4* — рациональный максимальный уровень установки временных средств подмащивания

Высота неудобной для обслуживания части вертикальной поверхности непосредственно под площадкой составляет 0,15 м, поскольку максимальная удобная высота работы над уровнем пола равна 1,65 м, а минимальная высота потолка над средствами подмащивания должна быть не менее 1,8 м. Кроме того, высота временных подмостей 1,8 м и более, согласно действующим «Правилам по охране труда при работе на высоте», утвержденным Приказом Минтруда России от 28 марта 2014 года № 155н, потребует выполнения более дорогостоящих работ на высоте. Согласно п. 12 указанного документа, «...работодатель для обеспечения безопасности работников должен по возможности исключить работы на высоте». Поэтому с учетом погрешностей изготовления рациональным является применение средств подмащивания с высотой не более 1,75 м над уровнем пола.

Расчетная схема для определения удобной для обслуживания доли вертикально ориентированной цилиндрической поверхности приведена на рис. 3, *б*.

Удобство обслуживания горизонтально ориентированных цилиндрических поверхностей. Для горизонтально ориентированной цилиндрической поверхности неудобные для обслуживания зоны могут находиться в верхней и нижней частях этой поверхности.

Рассмотрим сначала на основе анализа схем, приведенных на рис. 1 и 2, удобство обслуживания верхней части горизонтально ориентированной поверхности в зависимости от ее диаметра.

При диаметре цилиндрической поверхности до 1,25 м неудобная для обслуживания зона в ее верхней части отсутствует, поскольку работающий может нормально дотянуться и наблюдать даже верхнюю точку этой поверхности (рис. 4, а).

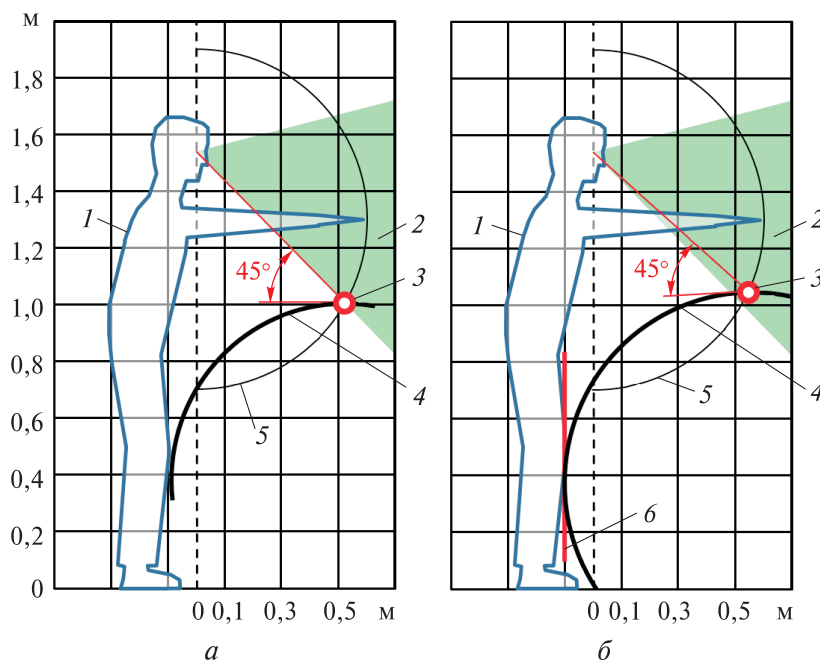


Рис. 4. Схемы обслуживания горизонтальной цилиндрической поверхности диаметром до 1,41 м:

a — до диаметра 1,25 м; *б* — в диапазоне диаметров 1,25...1,41 м; 1 — положение тела работающего; 2 — удобная зона зрительного наблюдения; 3 — точка проведения работ; 4 — обслуживаемый элемент РКН; 5 — зона досягаемости моторного поля; 6 — ограничение по упиранию элемента РКН в ноги работающего

При диаметре цилиндрической поверхности 1,25...1,41 м (рис. 4, б) в верхней ее части появляется участок, неудобный для обслуживания, поскольку работающий не может нормально наблюдать точки поверхности. Это происходит потому, что поверхность упирается в ноги работающего, не позволяя ему подойти ближе (см. рис. 4, б). При этом, начиная с диаметра 1,284 м, размеры неудобного для обслуживания участка поверхности определяются уже не ограничением его наблюдаемости, а невозможностью дотянуться до него из удобного положения.

Если диаметр цилиндрической поверхности превышает 1,41 м, работающий также не может из удобного положения работать в верхней части поверхности (рис. 5, *a*), но в этом случае ограничением является уже конструкция площадки в районе ступни рабочего, которая в дальнейших расчетах принята располагающейся в точке *b* на рис. 5, *a*.

В нижней части горизонтально ориентированных цилиндрических поверхностей из-за неудобных условий наблюдения всегда имеется неудобная для обслуживания область, определение края которой показано на рис. 5, *б*.

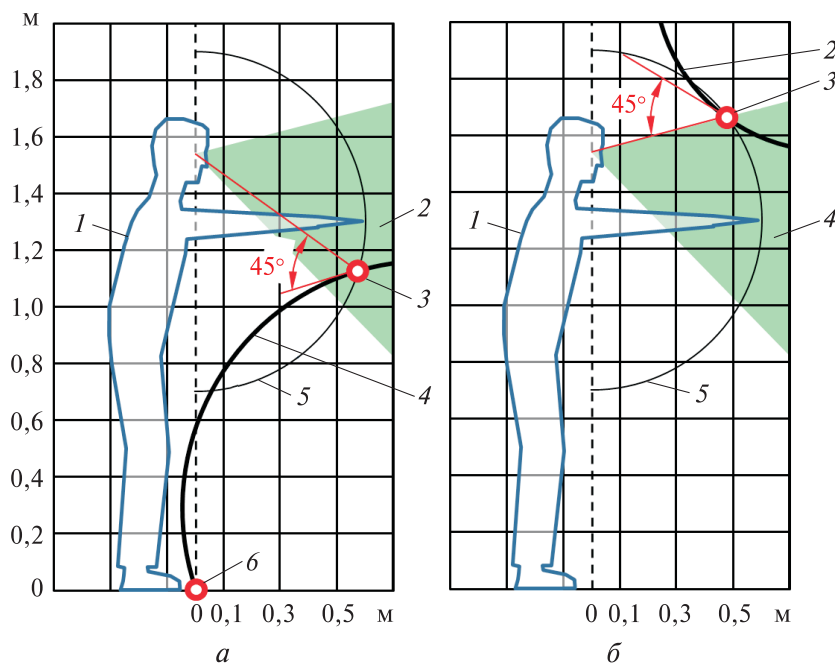


Рис. 5. Схемы обслуживания горизонтальной цилиндрической поверхности диаметром свыше 1,41 м:

a — верхняя часть поверхности при диаметре свыше 1,41 м; *б* — нижняя часть поверхности; для *a*: 1 — положение тела работающего; 2 — удобная зона зрительного наблюдения; 3 — точка проведения работ; 4 — обслуживаемый элемент РКН; 5 — зона досягаемости моторного поля; *б* — ограничение по упиранию элемента РКН в элементы ограждения у ступней работающего; для *б*: 1 — положение тела работающего; 2 — обслуживаемый элемент РКН; 3 — точка проведения работ; 4 — удобная зона зрительного наблюдения; 5 — зона досягаемости моторного поля

Результаты геометрических расчетов, проведенных согласно схемам на рис. 4 и 5, показаны в виде графика на рис. 6.

Если горизонтальная цилиндрическая поверхность имеет большой диаметр и ее боковая часть обслуживается с помощью неподвижных площадок, например, при сборке второй ступени РКН «Энергия» [16, с. 18–19], на ней будут образовываться неудобные для обслуживания

зоны, аналогичные по причинам возникновения случаю с вертикальными поверхностями. В то же время при возможности свободного вращения цилиндрического элемента РКН вокруг продольной оси, которая в некоторых случаях обеспечивается технологическим оборудованием [15, с. 159, с. 181], вся площадь поверхности может быть удобной для обслуживания.

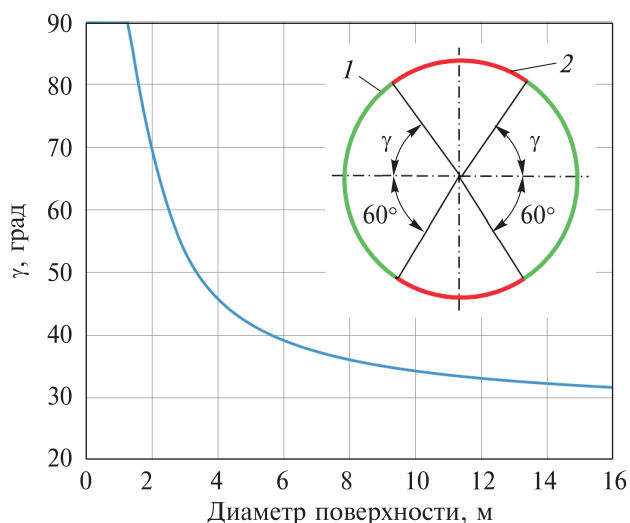


Рис. 6. Положения «удобно» (1) и «неудобно» (2) обслуживаемых участков на горизонтальной цилиндрической поверхности в зависимости от ее диаметра

Удобство обслуживания поверхностей других типов. Поскольку элементы РКН являются объемными телами, помимо цилиндрических, они содержат и другие типы поверхностей.

На рис. 7, а показаны критические значения наклона прямолинейных и конических с вертикальной осью поверхностей, которые находятся на границе удобства обслуживания. Для поверхности, нависающей над головой работающего (см. рис. 7, а), угол ее наклона относительно вертикали не должен превышать 60° по условию наблюдаемости. Для поверхности с уклоном от работающего, показанной в нижней части рис. 7, а, угол ее наклона относительно вертикали не должен превышать 23° , по условию досягаемости. Следовательно, торцевые поверхности элементов РКН в большинстве случаев являются удобно обслуживаемыми при горизонтальной технологии подготовки и неудобно обслуживаемыми — при вертикальной технологии подготовки.

Для более сложных поверхностей и их сочетаний возможен анализ удобства обслуживания с использованием схем, приведенных на рис. 1 и 2, аналогично тому, как этот анализ был проведен для выше-рассмотренных типов. Такие поверхности часто встречаются у око-

нечностей ракетных блоков и при обслуживании элементов, собранных в пакет (рис. 7, б, в). При этом можно получить распределение по поверхности элемента участков с удобным, неудобным и невозможным обслуживанием. Примеры таких видов распределения показаны на рис. 7, б, в.

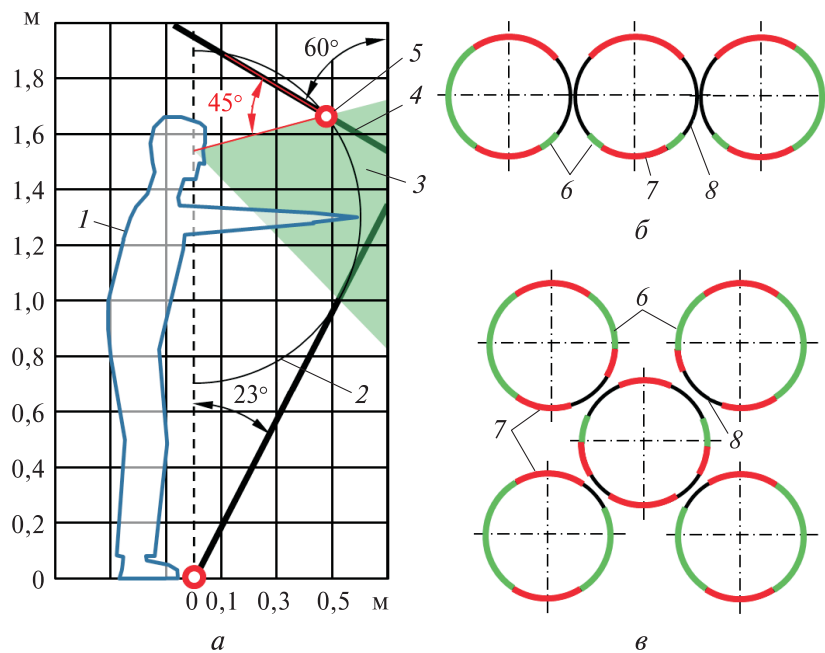


Рис. 7. Оценка удобства обслуживания поверхностей элементов РКН:

a — удобство обслуживания наклонных плоских и конических с вертикальной осью поверхностей; *б, в* — удобство обслуживания пакетов ракетных блоков; *1* — положение тела работающего; *2* — зона досягаемости моторного поля; *3* — удобная зона зрительного наблюдения; *4* — обслуживаемый элемент РКН; *5* — точка проведения работ; *6–8* — участки поверхности с удобным, неудобным и невозможным обслуживанием

Сравнение разных вариантов технологий подготовки. На основании полученных ранее результатов можно не только провести сравнение разных вариантов технологий подготовки элементов РКН для конкретных конструкций таких элементов, но и рассмотреть предельный случай длинных цилиндрических элементов РКН, влиянием обслуживания торцевых поверхностей которых можно пренебречь. Примем, что при горизонтальной технологии подготовки элемент РКН не вращается вокруг продольной оси, при вертикальной технологии основные площадки обслуживания не перемещаются, так как в этих случаях вся поверхность становится удобно обслуживаемой, и проводить сравнение не имеет смысла. Графики для сравнения доли удобно обслуживаемых участков поверхности таких элементов РКН в зависимости от их диаметра приведены на рис. 8.

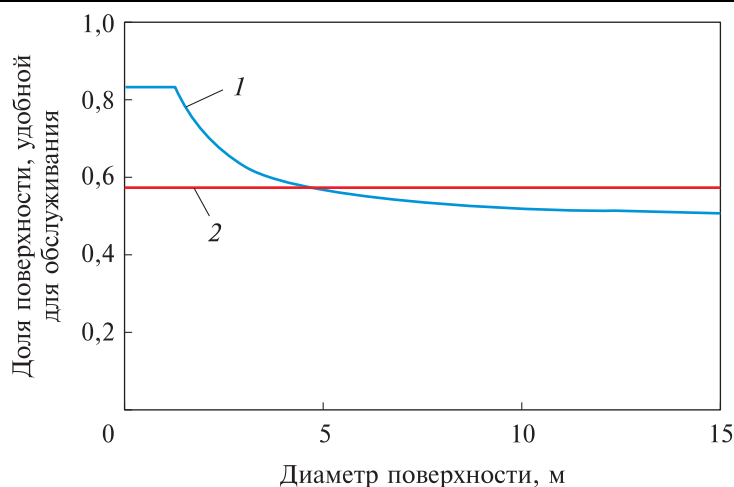


Рис. 8. Удобство обслуживания боковой поверхности цилиндрических ракетных блоков при горизонтальном и вертикальном вариантах технологии подготовки: 1 — доля удобно обслуживаемой площади поверхности при горизонтальной технологии подготовки; 2 — доля удобно обслуживаемой площади поверхности при вертикальной технологии подготовки для шага площадок 2 м

При малых диаметрах элементов РКН более удобным с позиции обслуживания наружных поверхностей является горизонтальная технология их подготовки, при больших — вертикальная, что подтверждается мировым опытом использования этих технологий. Для шага площадок 2 м диаметр цилиндрических поверхностей, при котором вертикальная технология начинает обеспечивать более удобное их обслуживание, составляет 4,5 м. Для реальных элементов РКН эти значения будут несколько выше из-за влияния торцевых поверхностей, которые удобнее обслуживать при горизонтальной технологии подготовки. Однако при использовании увеличенного шага площадок, используемого сейчас в стендах для обслуживания космических аппаратов, этот диаметр будет уменьшаться.

Полученные в статье зависимости для оценки удобства обслуживания разных типов поверхностей могут быть использованы для численной оценки удобства обслуживания отдельных поверхностей конкретного элемента РКН при различных технологиях его подготовки. Далее путем объединения полученных оценок для всех поверхностей этого элемента РКН может быть численно оценено удобство его обслуживания в целом при различных технологиях подготовки и составах средств обслуживания. Полученные результаты могут быть использованы при обосновании выбора технологии подготовки и состава средств обслуживания соответствующего элемента РКН.

Заключение. Предложен подход к оценке удобства обслуживания элементов РКН, который позволяет получить численную оценку удобства обслуживания элементов РКН при разных вариантах техно-

логии их подготовки и используемого технологического оборудования. Он может применяться в том числе и на ранних этапах проектирования, когда неизвестны точные места выполнения различных работ на поверхности этих элементов. Применение полученной численной оценки:

- критерий качества проектируемой или модернизируемой технологии подготовки элементов РКН;
- критерий качества соответствующего технологического оборудования;
- сравнительная оценка вариантов технологий подготовки и технологического оборудования вновь создаваемых и модернизируемых КРК СТК и, в меньшей степени, КРК других классов.

Результаты подтверждают обоснованность технических решений, принятых в отечественной практике, за исключением РКН СТК Н-1 и «Энергия», подготовка блоков большого диаметра которых проводилась в горизонтальном положении. Следует с осторожностью использовать эти результаты по отношению к космическим аппаратам типа модулей орбитальных станций, где значительная часть работ проводится внутри и, соответственно, необходимо учитывать эргономические требования по удобству работ внутри таких аппаратов, рассмотрение которых выходит за рамки данной статьи.

По полученным результатам можно сделать следующие выводы.

1. На основе действующих государственных стандартов в области эргономики предложена методика численной оценки доли удобно обслуживаемых поверхностей блоков ракет в вертикальном и горизонтальном вариантах подготовки.

2. Показано, что для цилиндрических поверхностей при применении обычных средств обслуживания при диаметре до 4,5 м более удобна горизонтальная подготовка, а при большем диаметре — вертикальная.

3. При использовании вращения ракеты в случае горизонтальной подготовки или подвижных площадок обслуживания для вертикальной подготовки доля удобно обслуживаемых поверхностей для боковой поверхности цилиндрических ракетных блоков может быть увеличена до 100 %.

4. Оценка удобства обслуживания при использовании различных технологий подготовки может быть получена для конкретных элементов РКН, в том числе многоблочных, а также для конкретных исполнений средств обслуживания, что может применяться для выбора технологии подготовки и конструкции средств обслуживания РКН в роли одной из характеристик их качества.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Donahue B. Space Launch System: Mission Opportunities Payload. *2017 IEEE Aerospace Conference*, Big Sky, MT, 2017, pp. 1–8.
DOI: 10.1109/AERO.2017.7943954
- [2] Qin T., Rong Y., Qin X., Zhang Z. The development characteristics and trends of heavy launch vehicles. *Aerospace China*, 2018, vol. 19 (4), pp. 29–37.
DOI: 10.3969/j.issn.1671-0940.2018.04.003
- [3] Данилюк А.Ю., Ключников В.Ю., Кузнецов И.И., Осадченко А.С. Создание сверхтяжелых ракет-носителей для исследования и освоения Луны и Марса: прошлое, настоящее, будущее. *Вестник НПО имени С.А. Лавочкина*, 2015, № 1 (27), с. 10–18.
- [4] Daniluk A.Y., Klyushnikov V.Yu., Kuznetsov I.I., Osadchenko A.S. The past, present, and future of super-heavy launch vehicles for research and exploration of the Moon and Mars. *Solar System Research*, 2015, vol. 49, pp. 490–499.
DOI: 10.1134/S0038094615070047
- [5] Губанов Б.И. *Триумф и трагедия «Энергии». Размышления главного конструктора. Т. 2: Космос приоткрывает двери*. Нижний Новгород, Изд-во Нижегородского института экономического развития, 1998, 240 с.
- [6] Данилюк А.Ю., Ключников В.Ю., Кузнецов И.И., Осадченко А.С. Проблемы создания перспективных сверхтяжелых ракет-носителей. *Вестник НПО имени С.А. Лавочкина*, 2015, № 1 (27), с. 10–18.
- [7] Daniluk A.Y., Klyushnikov V.Yu., Kuznetsov I.I., Osadchenko A.S. Problems of design and development of advanced superheavy launch vehicles. *Solar System Research*, 2016, 50, pp. 515–522. DOI:10.1134/S0038094616070042
- [8] Горбунов В.В. Эргономическая надежность самолетов разных «эргонимических поколений». *Проблемы безопасности полетов*, 2014, № 6, с. 20–32.
- [9] Нестерович Т.Б., Козлова Н.М. Учет психофизиологических характеристик и возможностей человека в авиации и космонавтике (по материалам научно-практической конференции). *Авиакосмическая и экологическая медицина*, 2017, т. 51, № 6, с. 64–66.
- [10] Рябец А.Я., Гришечко А.И., Ерофеенков С.С., Антонов О.Ф., Кряжин В.Н. Моделирование дискомфортных состояний рабочей позы человека-оператора. *Биотехносфера*, 2015, № 1 (37), с. 14–20.
- [11] *История развития отечественной наземной ракетно-космической инфраструктуры*. Москва, Столичная энциклопедия, 2017, 504 с.
- [12] Крутов А.А., Пигусов Е.А., Чернавских Ю.Н., Черноусов В.И. Концептуальное проектирование тяжелого транспортного самолета нового поколения. *Труды МАИ*, 2018, № 99.
URL: <http://trudymai.ru/published.php?ID=91810> (дата обращения 14.12.2019).
- [13] Универсальный рамповый грузовой самолет Ил-96-500Т на базе Ил-96-400Т для перевозки широкой номенклатуры грузов. *Официальный сайт Союза авиапроизводителей России*.
URL: http://www.aviationunion.ru/Files/Nom_1_PAO_II.pdf (дата обращения 15.03.2020).
- [14] 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. Сб. тез. Т. 1*. Москва, Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2019, с. 329–330.

- [15] Бирюков Г.П., Манаенков Е.Н., Левин Б.К. *Технологическое оборудование отечественных ракетно-космических комплексов*. Фадеев А.С., Торпачев А.В., ред. Москва, Рестарт, 2011, 600 с.
- [16] *Стартует «Энергия»*. Москва, Машиностроение, 1989, 56 с.

Статья поступила в редакцию 01.03.2021

Ссылку на эту статью просим оформлять следующим образом:

Игрицкий В.А. Оценка удобства обслуживания элементов ракет космического назначения сверхтяжелого класса при различных технологиях их подготовки. *Инженерный журнал: наука и инновации*, 2021, вып. 4.

<http://dx.doi.org/10.18698/2308-6033-2021-4-2072>

Игрицкий Владимир Александрович — канд. техн. наук, доцент кафедры «Стартовые ракетные комплексы» МГТУ им. Н.Э. Баумана.
e-mail: igritsky_v_a@bmstu.ru

Evaluation of the convenience of servicing elements of super-heavy space rockets with various technologies for their preparation

© V.A. Igritsky

Bauman Moscow State Technical University, Moscow, 105005, Russia

Currently, Russia, the United States and China are creating new super-heavy class (SHC) launch vehicles (LV). One of the distinctive features of SHC LV and their elements is their large cross dimensions, up to 10 m in diameter, which significantly exceeds the characteristic cross dimensions of LV elements of other classes. This has a significant impact on the serviceability of these elements in preparation for launch and, consequently, on the productivity, safety and reliability of the corresponding operations, and, as a result, on the reliability of the SHC LV as a whole. The paper analyzes the ergonomics of temporary workstations used in servicing the surfaces of LV elements, depending on the curvature and orientation of the surface of the serviced element. The analysis is based on the current Russian ergonomics standards. For the lateral surfaces of the cylindrical LV elements, a comparison was made of the proportion of surfaces that are convenient and inconvenient for servicing when using vertical and horizontal technologies for their preparation and various servicing facilities. The study shows that when using the service platforms, stationary relative to the element, the vertical preparation technology becomes more preferable when the element diameter is more than 4.5 m. In this case, the rotation of the element in a horizontal position around the longitudinal axis with the horizontal preparation technology or the use of platforms moved in the vertical direction with the vertical preparation technology make it possible to ensure the serviceability of the entire lateral surface of the cylindrical LV elements. The possibility of taking into account other surfaces of the serviced element of the LV for a numerical estimation of the convenience of various options for their preparation is also shown.

Keywords: launch vehicles servicing, super heavy-lift launch vehicles, technology for launch vehicles preparation, launch vehicles serviceability, ergonomics of launch vehicles servicing

REFERENCES

- [1] Donahue B. Space Launch System: Mission Opportunities Payload. *2017 IEEE Aerospace Conference*, Big Sky, MT, 2017, pp. 1–8, DOI: 10.1109/AERO.2017.7943954
- [2] Qin Tong, Rong Yi, Qin Xudong, Zhang Zhi. The development characteristics and trends of heavy launch vehicles. *Aerospace China*, 2018, vol. 19 (4), pp. 29–37.
- [3] Daniluk A.Yu., Klyushnikov V.Yu., Kuznetsov I.I., Osadchenko A.S. *Vestnik NPO imeni S.A. Lavochkina (Bulletin of Lavochkin Association)*, 2015, no. 1 (27), pp. 10–18.
- [4] Daniluk A.Y., Klyushnikov V.Yu., Kuznetsov I.I., Osadchenko A.S. The past, present, and future of super-heavy launch vehicles for research and exploration of the Moon and Mars. *Solar System Research*, 2015, vol. 49, pp. 490–499. DOI: 10.1134/S0038094615070047
- [5] Gubanov B.I. *Triumf i tragediya «Energii». Razmyshleniya glavnogo konstruktora. T. 2. Kosmos priotkryvaet dveri* [Triumph and tragedy of the

- “Energy”. Reflections of the chief designer. Vol. 2. Space opens the doors]. Nizhniy Novgorod, Nizh. inst. ekonom. razv. Publ., 1998, 240 p.
- [6] Daniluk A.Yu., Klyushnikov V.Yu., Kuznetsov I.I., Osadchenko A.S. *Vestnik NPO imeni S.A. Lavochkina (Bulletin of Lavochkin Association)*, 2015, no. 1 (27), pp. 10–18.
- [7] Daniluk A.Y., Klyushnikov V.Yu., Kuznetsov I.I., Osadchenko A.S. Problems of design and development of advanced superheavy launch vehicles. *Solar System Research*, 2016, vol. 50, pp. 515–522. DOI: 10.1134/S0038094616070042
- [8] Gorbunov V.V. *Problemy bezopasnosti poletov (Flight safety problems)*, 2014, no. 6, pp. 20–32.
- [9] Nesterovich T.B., Kozlova N.M. *Aviakosmicheskaya i ekologicheskaya meditsina — Aerospace and Environmental Medicine*, 2017, vol. 51, no. 6, pp. 64–66.
- [10] Ryabets A.Ya., Grisechko A.I., Erofeenkov S.S., Antonov O.F., Kryazhin V.N. *Biotekhnosfera (Biosphere)*, 2015, no. 1 (37), pp. 14–20.
- [11] *Istoriya razvitiya otechestvennoy nazemnoy raketno-kosmicheskoy infrastruktury* [History of development of Russian ground rocket and space infrastructure]. Moscow, Izd. dom “Stolichnaya entsiklopediya” Publ., 2017, 504 p.
- [12] Krutov A.A., Pigusov E.A., Chernavskikh Yu.N., Chernousov V.I. *Trudy MAI — Proceedings of MAI*, 2018, no. 99. Available at: <http://trudymai.ru/published.php?ID=91810> (accessed December 14, 2019).
- [13] Universalny rampovy gruzovoy samolet Il-96-500T na baze Il-96-400T dlya perevozki shirokoy nomenklatury gruzov [IL-96-500T universal ramp cargo aircraft based on IL-96-400T for transportation of a wide range of cargo]. *Ofitsialny sayt Soyuzo aviaprodukteley Rossii* [Official website of the Union of Russian Aircraft Manufacturers]. Available at: http://www.aviationunion.ru/Files/Nom_1_PAO_Il.pdf (accessed March 15, 2020).
- [14] Igritsky V.A. O chislennoy otsenke udobstva obsluzhivaniya raket kosmicheskogo naznacheniya sverkhtyazhelogo klassa i ikh elementov pri gorizontalnomy i vertikalnom variantakh tekhnologii ikh podgotovki [On the numerical estimation of serviceability of super-heavy class launch vehicles and their elements with horizontal and vertical options for their preparation technology]. *XLIII Akademicheskie chteniya po kosmonavtike, posvyashchennye pamyati akademika S.P. Koroleva i drugikh vydayushchikhsya otechestvennykh uchenykh — pionerov osvoeniya kosmicheskogo prostranstva. Sbornik tezisov, t. 1* [XLIII Academic readings on cosmonautics dedicated to the memory of academician S.P. Korolev and other prominent Russian scientists — pioneers of space exploration. Collected abstracts, vol. 1]. Moscow, BMSTU Publ., 2019, pp. 329–330.
- [15] Biryukov G.P., Manaenkov E.N., Levin B.K. *Tekhnologicheskoe oborudovanie otechestvennykh raketno-kosmicheskikh kompleksov* [Technological equipment of Russian rocket and space systems]. Fadeev A.S., Torpachev A.V., eds. Moscow, Restart Publ., 2011, 600 p.
- [16] *Startuet «Energia»* [The “Energy” blasts off]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1989, 56 p.

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