

**Текстурирование поверхностей 3D-моделей
при эргономическом анализе операций подготовки
изделий ракетно-космической техники
в виртуальной реальности**

© В.А. Игрицкий, А.Ю. Игрицкая, Ю.А. Бондарева, М.А. Цой

МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, 105005, Российская Федерация

Одним из основных путей повышения надежности работы изделий ракетно-космической техники является уменьшение количества ошибок персонала при подготовке этих изделий. Это можно достигать в том числе и применением средств виртуальной и дополненной реальности при эргономическом анализе временных рабочих мест и создании учебно-тренировочных комплексов. Предложены различные способы текстурирования поверхностей 3D-моделей, позволяющие в виртуальной реальности визуально определять допустимость угла отклонения поверхности от положения, перпендикулярного к линии взора, тем самым выделяя удобно и неудобно обслуживаемые участки поверхностей по этому критерию, сложно определяемому другими методами. Проведен сравнительный анализ качества выделения удобно обслуживаемых участков поверхностей с помощью предложенных способов текстурирования, а также их экспериментальная отработка в программных комплексах «КОМПАС-3D» и VR Сопсерт, на основе которой даны рекомендации по использованию в разных случаях трех наиболее рациональных способов текстурирования поверхностей.

Ключевые слова: подготовка космических аппаратов, подготовка ракет, обслуживание космических аппаратов, обслуживание ракет, эргономический анализ, виртуальная реальность, тренажер в виртуальной реальности

Введение. Из-за относительно редких пусков каждого типа ракет-носителей (РН), разгонных блоков (РБ) и космических аппаратов (КА) персонал, обеспечивающий их подготовку, успевает в значительной степени утратить квалификацию в период между пусками, а эргономике временных рабочих мест уделяется лишь минимум внимания. В то же время в настоящий момент ошибки персонала стали одной из основных причин отказов изделий ракетно-космической техники (РКТ). Поэтому одним из основных путей дальнейшего повышения надежности РКТ является уменьшение количества ошибок персонала, что может быть достигнуто благодаря повышению эргономических качеств рабочих мест и улучшению условий тренировки персонала [1].

Особенно актуален этот вопрос при организации обслуживания крупногабаритных ракетных блоков [2], используемых в составе разрабатываемых в настоящее время в США [3, 4] и перспективных для разработки в России и Китае РН сверхтяжелого класса и соответствующих им РБ нового поколения [5–7], диаметр которых может превышать 10 м.

При создании и эксплуатации тренажеров с физическими макетами рабочих мест требуются достаточно существенные материальные и временные затраты, что затрудняет их применение до полного завершения разработки соответствующего оборудования при подготовке к проведению работ с несерийными КА. Поэтому одним из наиболее многообещающих подходов к улучшению эргономических качеств наземного оборудования и улучшения условий тренировки персонала является использование средств виртуальной реальности (ВР) и дополненной реальности (ДР), в том числе с отображением тела оператора в ВР [8], получивших распространение при создании тренажеров для других задач [9–16].

Одним из наиболее сложно определяемых при эргономическом анализе факторов является удобство зрительного контроля с точки зрения обеспечения допустимого угла отклонения наблюдаемой поверхности от плоскости, перпендикулярной линии зрения, который далее будем обозначать α и называть углом отклонения (рис. 1). Согласно ГОСТ 23000–78, угол отклонения не должен превышать 45° для лицевой поверхности средств отображения информации (см. рис. 1) [2]. Однако и для прочих видов работ, которые по действующим требованиям должны контролироваться визуально, рационально использовать аналогичные требования для поверхностей, на которых производятся эти работы, поскольку сам процесс проведения работ в этом случае играет роль средства отображения информации.

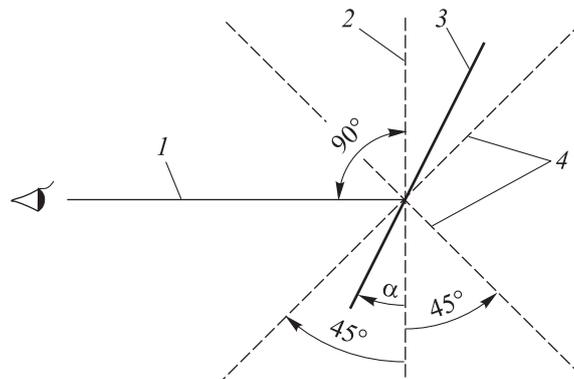


Рис. 1. Расположение лицевой поверхности средств отображения информации относительно линии зрения оператора и допустимый угол отклонения по ГОСТ 23000–78:

1 — линия зрения оператора; 2 — оптимальное расположение лицевой поверхности средств отображения информации (поверхности обслуживаемого элемента); 3 — пример расположения лицевой поверхности средств отображения информации (поверхности обслуживаемого элемента); 4 — расположения лицевой поверхности средств отображения информации (поверхности обслуживаемого элемента) при максимально допустимом угле отклонения; α — угол отклонения

В виртуальной реальности и при визуализации 3D-моделей в дополненной реальности удобно и неудобно наблюдаемые поверхности могут ясно различаться без каких-либо сложностей, если цвет поверхности может быть задан как зависящий от угла отклонения. Однако в настоящее время программные комплексы (ПК) виртуальной и дополненной реальности не поддерживают такие способы окрашивания поверхностей.

В этих условиях предлагается использовать модели со специальным образом текстурированными и окрашенными поверхностями, цвет которых зависит от угла отклонения вследствие полного затенения окрашенных элементов при углах отклонения, превышающих допустимые.

Необходимыми для реализации предложенного подхода свойствами обладают глухие отверстия с контрастно, по сравнению с остальной поверхностью, окрашенным дном, видимым наблюдателю только при допустимых значениях угла отклонения. Дно таких отверстий, как правило, выгодно выполнять плоским. При этом поверхность должна быть покрыта такими отверстиями по возможности полностью, а их размер должен быть достаточно мал для обеспечения ясной видимости границы удобно и неудобно наблюдаемых частей поверхности.

С точки зрения постоянства угла отклонения, при котором должна обеспечиваться граница видимости дна отверстий, наиболее выгодно применение круглых глухих отверстий (КГО), поскольку для них угол отклонения не зависит от того, с какого направления на них смотрит наблюдатель. Однако применение КГО обладает рядом недостатков. Наиболее существенными из них являются: невозможность замостить КГО одного размера всю обслуживаемую поверхность без пропусков; повышенная сложность вычислений, так как большинство современных ПК виртуальной и дополненной реальности используют только плоские грани для отображения 3D-моделей. Поэтому внутренняя цилиндрическая поверхность КГО отображается в виде большого числа плоских граней, которые из-за своей многочисленности могут существенно замедлить расчеты при построении сцены. Кроме того, из-за отрисовки многоугольных отверстий вместо круглых будут возникать погрешности определения угла отклонения.

По этой причине перспективным представляется использование глухих отверстий с сечениями в виде правильных многоугольников, количество граней при отрисовке которых существенно меньше, а их размещение на поверхности может быть более плотным. Далее такие отверстия будем называть просто многоугольными глухими отверстиями (МГО). Недостатком использования МГО являются дополнительные погрешности угла отклонения, обусловленные колебаниями

максимального расстояния между противоположными точками сечения отверстия в зависимости от места размещения наблюдателя.

В задачах обслуживания цилиндрических поверхностей практическое значение может иметь только угол наблюдения в плоскости поперечного сечения цилиндра. В этом случае преимущество могут получить продольные пазы квадратного сечения, возможно, с закругленным дном, более простые для отрисовки (рис. 2).

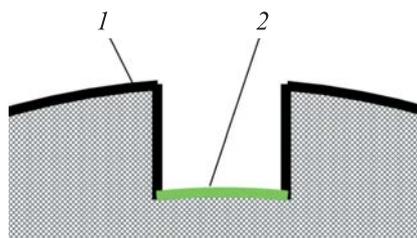


Рис. 2. Поперечное сечение продольного паза квадратного сечения на цилиндрической поверхности (соседние пазы, которыми должна быть покрыта поверхность, условно не показаны):

1 — текстурируемая цилиндрическая поверхность; 2 — плоское или цилиндрическое дно паза

Целью работы является анализ возможностей текстурирования поверхностей 3D-моделей и разработка рекомендаций по его применению для обеспечения визуального контроля допустимости углов их отклонения в ВР и ДР с использованием круглых и многогранных глухих отверстий, а также продольных пазов.

Ранее эти вопросы частично освещались авторами в работе [17].

Используемые методы и принимаемые допущения. В рамках работы будут использоваться теоретические расчеты с использованием известных геометрических соотношений, анализ графического представления полученных зависимостей, а также опытное 3D-моделирование и отрисовка текстурированных поверхностей в ВР.

Варианты текстурирования поверхностей с использованием отверстий разных размеров в данной работе рассматриваться не будут, поскольку при относительно небольшом улучшении условий визуального анализа углов отклонения их значительно сложнее создать в виде 3D-моделей.

Примем следующие допущения:

– максимально допустимый угол отклонения составляет 45° по ГОСТ 12.2.033–78;

– при расчете видимости дна отверстия его размеры малы по сравнению с расстоянием до наблюдателя, что позволяет считать наблюдаемые лучи параллельными;

– при использовании некруглых отверстий недопустимой является ситуация, когда на неудобно наблюдаемой по ГОСТ 12.2.033–78 части поверхности виден цвет дна отверстия, сигнализирующий об удобстве его наблюдения.

Для каждого из рассматриваемых типов МГО анализ условий видимости их дна будем проводить для двух положений наблюдателя

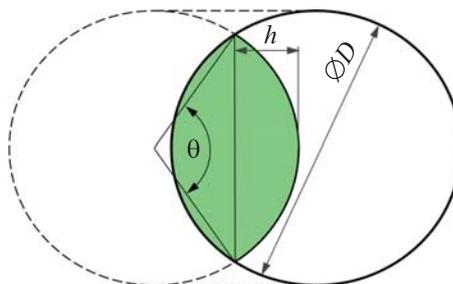
по отношению к его граням в плоскости сечения отверстия. Эти положения будут выбираться такими, при которых наблюдатель может видеть внутренние части МГО на наибольшую и наименьшую глубину для оценки погрешностей определения удобства или неудобства обслуживания соответствующих поверхностей.

Поскольку рассматриваемыми в статье видами МГО можно покрыть поверхность с минимальными промежутками, определяемыми только ограничениями, связанными с округлениями при вычислениях, то поправки на площадь не затронутой отверстиями части поверхности для МГО рассматриваться не будут.

Текстурирование поверхностей круглыми глухими отверстиями. В случае КГО чечевицеобразная фигура, в виде которой будет наблюдаться его дно, без учета наклона поверхности к линии взгляда представляет собой два сегмента круга, составленные вместе по длинной стороне, как показано на рис. 3. При учете этого наклона дуги окружностей, ее образующих, преобразуются в эллиптические дуги. Однако при принятых допущениях соотношение площадей разных цветов в поле зрения при учете наклона не изменится, что позволяет проводить соответствующие вычисления без учета наклона.

Рис. 3. Форма фигуры, в виде которой видно дно глухого цилиндрического отверстия при наклонном взоре без учета наклона:

θ — угол дуги видимой части окружности дна; h — высота сегмента; D — диаметр отверстия



При принятых допущениях:

$$H = D,$$

где H — требуемая глубина КГО.

Определение площади фигуры, в виде которой видно дно КГО:

$$h = \frac{D - H \operatorname{tg} \alpha}{2};$$

$$\theta = \begin{cases} 2 \arccos \left(1 - 2 \frac{h}{D} \right), & \text{если } h > 0, \\ 0 & \text{в противном случае;} \end{cases}$$

$$S = \frac{D^2}{4} (\theta - \sin \theta),$$

где h — высота каждого из двух сегментов, составляющих видимую часть дна отверстия (см. рис. 3); S — площадь чечевицеобразной фигуры видимой части дна КГО, состоящей в проекции на плоскость обслуживаемой поверхности из двух сегментов круга.

Площадь поперечного сечения КГО S_0 описывается формулой

$$S_0 = \frac{\pi D^2}{4},$$

а относительная площадь видимой части дна КГО по отношению к общей площади его сечения

$$\sigma_0 = \frac{S}{S_0} = \frac{\theta - \sin \theta}{\pi}.$$

Полученная зависимость отношения видимой площади дна КГО к полной площади его дна от угла отклонения показана на рис. 4. В основном эта зависимость близка к линейной, кроме наиболее ответственного участка при приближении к 45° . Чем выше идет график на рис. 4, как и далее на рис. 6, 15, 16, тем более качественно в соответствующих случаях отображается область поверхности, удобная для обслуживания.

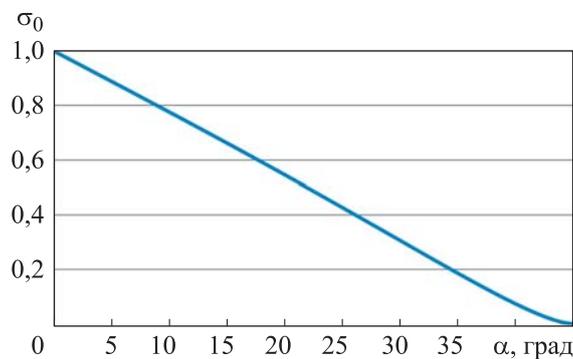


Рис. 4. Зависимость отношения видимой площади дна круглого глухого отверстия к полной площади его дна σ_0 от угла отклонения α между линией взора и нормалью к поверхности

Рассчитаем максимальную относительную площадь, которую при взгляде на поверхность с КГО, расположенными практически вплотную, занимает цвет дна отверстий на этой поверхности в зависимости от способа расположения отверстий (рис. 5).

Площадь S_n многоугольника, выраженная через радиус r вписанной окружности, в общем случае определяется зависимостью [18, с. 54]

$$S_n = nr^2 \operatorname{tg} \frac{\pi}{n},$$

где n — число сторон многоугольника.

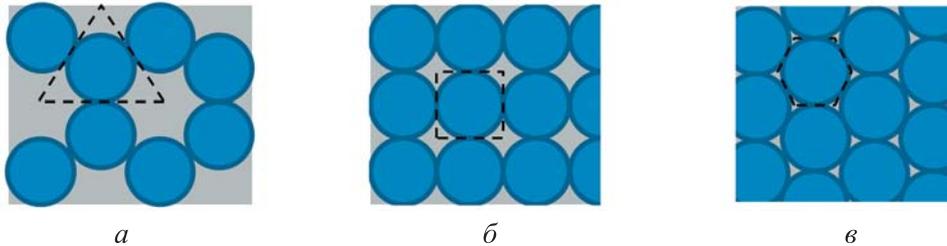


Рис. 5. Разные способы размещения КГО на поверхности. Отверстия находятся в центрах треугольников (а), квадратов (б), шестиугольников (в)

Отсюда можно рассчитать площадь правильных n -угольников, которыми может быть замощена плоскость, в зависимости от диаметра D вписанной окружности:

$$S_{03} = \frac{3\sqrt{3}}{4} D^2;$$

$$S_{04} = D^2;$$

$$S_{06} = \frac{\sqrt{3}}{2} D^2,$$

где S_{03} , S_{04} , S_{06} — соответственно площади треугольника, квадрата и правильного шестиугольника, описанных вокруг поперечного сечения КГО.

Относительные площади при расположении КГО в центрах треугольной, прямоугольной и шестиугольной сетки составят:

$$\sigma_3 = \frac{\sigma_0}{S_{03}} = \frac{\theta - \sin \theta}{3\sqrt{3}} \approx 0,192(\theta - \sin \theta);$$

$$\sigma_4 = \frac{\sigma_0}{S_{04}} = \frac{1}{4}(\theta - \sin \theta) \approx 0,25(\theta - \sin \theta);$$

$$\sigma_6 = \frac{\sigma_0}{S_{06}} = \frac{\theta - \sin \theta}{2\sqrt{3}} \approx 0,289(\theta - \sin \theta),$$

где σ_3 , σ_4 , σ_6 — относительные площади поперечных сечений КГО по отношению соответственно к площадям треугольника, квадрата и правильного шестиугольника, описанных вокруг поперечного сечения КГО.

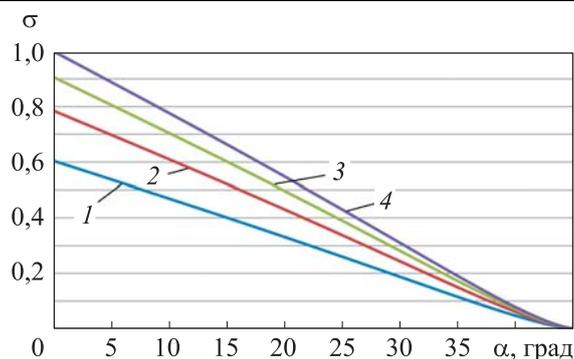


Рис. 6. Результаты расчета доли цвета дна КГО в зависимости от угла отклонения α :

σ — доля цвета дна отверстий в видимой проекции поверхности; 1–3 — результаты расчетов при расположении КГО в центрах треугольной, прямоугольной и шестиугольной сетки соответственно; 4 — предельно достижимые значения, показанные на рис. 4

Результаты расчета доли цвета дна КГО в зависимости от угла отклонения приведены на рис. 6. Из этих графиков видно, что расположение КГО в центрах квадратной сетки с размером ячейки, близким к описанному вокруг отверстия, незначительно уступает его расположению в аналогичной шестиугольной сетке, но оба этих варианта лучше треугольной сетки. Поэтому использование квадратной сетки в случае прямоугольных панелей можно считать оправданным с учетом простоты создания соответствующих 3D-моделей, а в прочих случаях более рационально применение шестиугольной сетки.

Примеры того, как выглядят в ВР поверхности, текстурированные КГО, размещенными по квадратной и шестиугольной сеткам, приведены на рис. 7 и 8 соответственно.

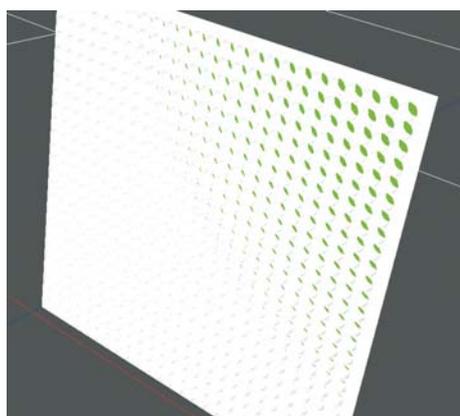


Рис. 7. Поверхность в ВР, текстурированная КГО по квадратной сетке

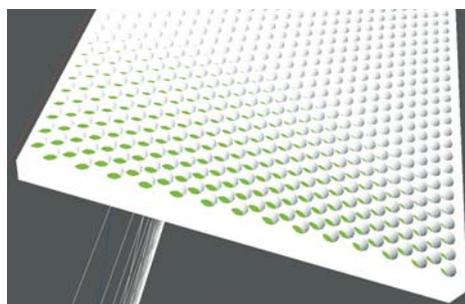


Рис. 8. Поверхность в ВР, текстурированная КГО по шестиугольной сетке

Текстурирование поверхностей глухими отверстиями с сечением в виде равностороннего треугольника. Для треугольного отверстия видимая часть его дна в проекции на плоскость обслуживаемой поверхности при любом направлении обзора будет представлять собой равносторонний треугольник (рис. 9).

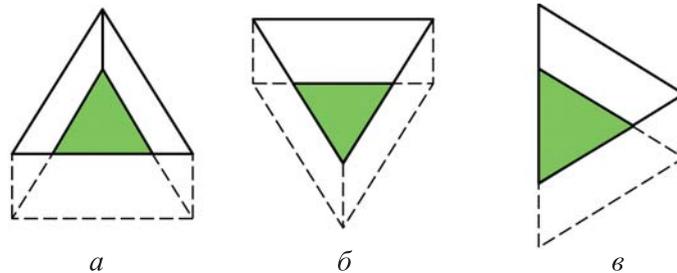


Рис. 9. Ориентация МГО треугольного сечения относительно наблюдателя:
a — серединой стороны к наблюдателю; *б* — углом к наблюдателю;
в — одна из граней отверстия параллельна линии зрения

Высота треугольного сечения отверстия h_3 будет составлять [18, с. 50]

$$h_3 = \frac{\sqrt{3}}{2} a,$$

где a — длина стороны треугольного сечения отверстия.

Требуемая глубина отверстия H_3 при принятых допущениях

$$H_3 = a.$$

Максимальная длина b_{31} незатеняемой зоны вдоль проекции линии взгляда на обозреваемую поверхность при ориентации, когда одна из граней отверстия параллельна линии зрения:

$$b_{31} = a - H_3 \operatorname{tg} \alpha,$$

а относительная площадь видимой части дна σ_{31} при этой ориентации

$$\sigma_{31} = \begin{cases} \frac{b_{31}^2}{a^2}, & \text{если } b_{31} > 0, \\ 0 & \text{в противном случае.} \end{cases}$$

При расположении отверстия углом к наблюдателю или от наблюдателя максимальная длина b_{32} незатеняемой зоны вдоль проекции линии взгляда на обозреваемую поверхность

$$b_{32} = h_3 - H_3 \operatorname{tg} \alpha,$$

тогда относительная площадь видимой части дна σ_{32} при этих вариантах ориентации

$$\sigma_{32} = \begin{cases} \frac{b_{32}^2}{h_3^2}, & \text{если } b_{32} > 0, \\ 0 & \text{в противном случае.} \end{cases}$$

Пример того, как выглядит текстурированная МГО треугольного сечения поверхность в ВР, показан на рис. 10.

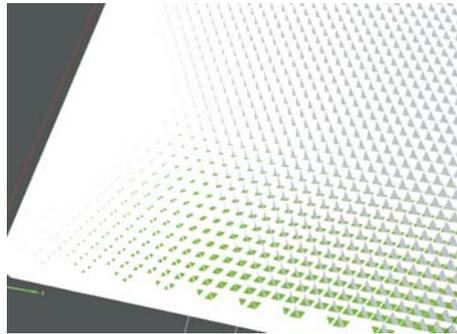


Рис. 10. Текстурированная МГО треугольного сечения поверхность в виртуальной реальности

Текстурирование поверхностей глухими отверстиями с квадратным сечением. Для МГО квадратного сечения видимая часть его дна в проекции на плоскость обслуживаемой поверхности в зависимости от направления взгляда и угла отклонения будет представлять квадрат или вытянутый прямоугольник (рис. 11).

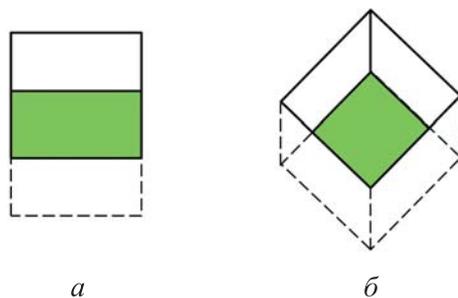


Рис. 11. Ориентация МГО квадратного сечения относительно наблюдателя:
 a — серединой стороны к наблюдателю;
 b — углом к наблюдателю

Длина диагонали квадратного сечения отверстия D_4 будет составлять [18, с. 53]

$$D_4 = \sqrt{2}a,$$

где a — длина стороны квадратного сечения отверстия.

Требуемая глубина отверстия H_4 при принятых допущениях

$$H_4 = D_4.$$

Максимальная длина незатеняемой зоны вдоль проекции линии взгляда на обозреваемую поверхность при ориентации, когда одна из граней отверстия параллельна линии взора b_{41} определяется по формуле

$$b_{41} = a - H_4 \operatorname{tg} \alpha.$$

Относительная площадь видимой части дна σ_{41} при этой ориентации будет зависеть от параметра b_{41} линейно:

$$\sigma_{41} = \begin{cases} \frac{b_{41}}{a}, & \text{если } b_{41} > 0, \\ 0 & \text{в противном случае.} \end{cases}$$

При расположении отверстия углом к наблюдателю максимальная длина незатеняемой зоны вдоль проекции линии взгляда на обозреваемую поверхность b_{42} составит

$$b_{42} = D_4 - H_4 \operatorname{tg} \alpha,$$

а относительная площадь видимой части дна σ_{42} при этой ориентации будет определяться выражением

$$\sigma_{42} = \begin{cases} \frac{b_{42}^2}{D_4^2}, & \text{если } b_{42} > 0, \\ 0 & \text{в противном случае.} \end{cases}$$

Пример того, как выглядят текстурированная МГО квадратного сечения поверхность в ВР, показан на рис. 12.

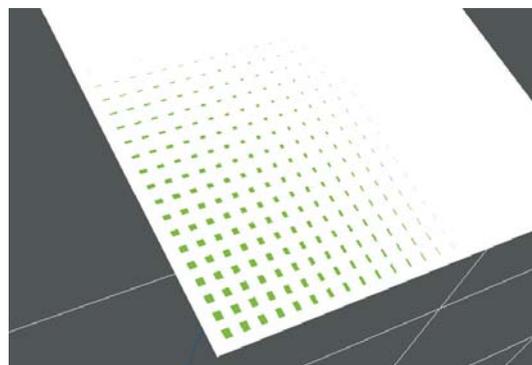


Рис. 12. Текстурированная МГО квадратного сечения поверхность в виртуальной реальности

Текстурирование поверхностей глухими отверстиями с сечением в виде правильного шестиугольника. Для шестиугольного отверстия видимая часть его дна в проекции на плоскость обслуживаемой поверхности в зависимости от направления и угла обзора будет представлять собой четырехугольник или шестиугольник, как показано на рис. 13.

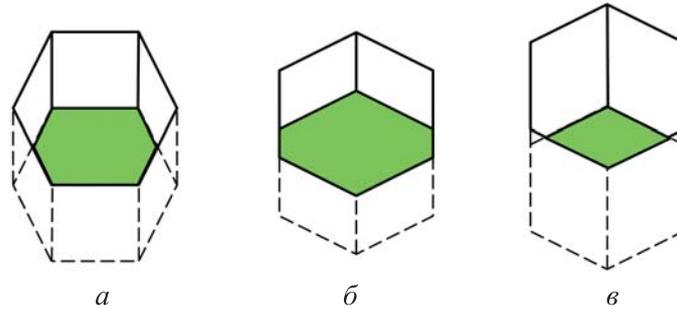


Рис. 13. Ориентация МГО шестиугольного сечения относительно наблюдателя:
a — серединой стороны к наблюдателю; *б, в* — углом к наблюдателю,
 при разных углах обзора α (см. рис. 1)

Соотношения размеров диагонали, высоты и стороны шестиугольного сечения отверстия составляют [18, с. 54]:

$$D_6 = 2a_6;$$

$$d_6 = \frac{\sqrt{3}}{2} D_6 = \sqrt{3}a_6,$$

где D_6 — диагональ (диаметр описанной окружности) шестиугольного сечения МГО; a_6 — сторона шестиугольного сечения МГО; d_6 — высота (диаметр вписанной окружности) шестиугольного сечения МГО.

Требуемая глубина отверстия шестиугольного сечения H_6 при принятых допущениях

$$H_6 = D_6.$$

Максимальная длина незатеняемой зоны вдоль проекции линии взгляда на обозреваемую поверхность b_{61} при ориентации стороной к наблюдателю составит

$$b_{61} = d_6 - H_6 \operatorname{tg} \alpha,$$

площадь поперечного сечения отверстия [18, с. 54]

$$S_6 = \frac{\sqrt{3}}{2} d_6^2,$$

относительная площадь видимой части дна σ_{61} при этой ориентации можно рассчитать с помощью выражения

$$\sigma_{61} = \begin{cases} \frac{b_{61} \left(a + \left(b_{61} / (2\sqrt{3}) \right) \right)}{S_6}, & \text{если } b_{61} > 0, \\ 0 & \text{в противном случае.} \end{cases}$$

При расположении отверстия углом к наблюдателю максимальная длина затеняемой зоны c_{62} вдоль проекции линии зрения на обзриваемую поверхность составит

$$c_{62} = H_6 \operatorname{tg} \alpha,$$

а длина незатеняемой зоны b_{62} соответственно

$$b_{62} = D_6 - c_{62}.$$

Относительная площадь видимой части дна σ_{62} при этой ориентации будет определяться выражением

$$\sigma_{62} = \begin{cases} \frac{S_6 - c_{62}d_6}{S_6}, & \text{если } a_6 > c_{62}, \\ \frac{\sqrt{3}}{2} b_{62}^2 / S_6, & \text{если } D_6 > c_{62} > a_6 \operatorname{tg} \alpha, \\ 0 & \text{в противном случае.} \end{cases}$$

Пример того, как выглядят текстурированная МГО шестиугольного сечения поверхность в ВР, показан на рис. 14.

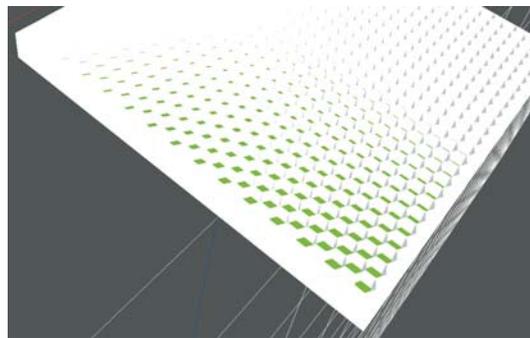


Рис. 14. Текстурированная глухими шестиугольными отверстиями поверхность в виртуальной реальности

Текстурирование поверхностей пазами. В направлении поперек продольной оси паза длина незатеняемой зоны b_{21} составит

$$b_{21} = a - a \operatorname{tg} \alpha,$$

где a — ширина паза.

Требуемая глубина паза H_2 при принятых допущениях

$$H_2 = a.$$

Относительная площадь видимой части дна паза в направлении поперек продольной оси паза σ_{21} можно рассчитать, используя выражение

$$\sigma_{21} = \begin{cases} b_{21}, & \text{если } b_{21} > 0, \\ a & \\ 0 & \text{в противном случае.} \end{cases}$$

Сравнительный анализ предложенных способов текстурирования поверхностей. Графики изменения доли цвета дна МГО и пазов в зависимости от угла отклонения в сравнении с КГО приведены на рис. 15.

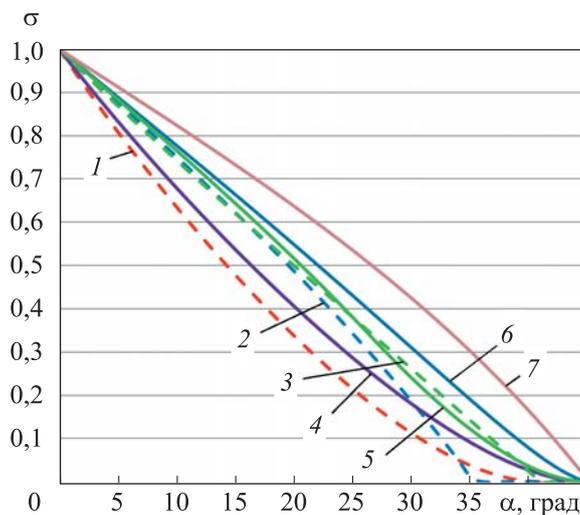


Рис. 15. Зависимость доли цвета дна от угла наблюдения при различных способах текстурирования поверхности:

1–3 — минимальная доля цвета дна для треугольных, квадратных и шестиугольных отверстий соответственно; 4 — совпадающая максимальная доля цвета дна для треугольных и квадратных отверстий; 5 — максимальная доля цвета дна для шестиугольных отверстий; 6 — для круглых отверстий без учета промежутков между ними; 7 — доля цвета дна пазов квадратного сечения в направлении, перпендикулярном их продольной оси

Согласно анализу приведенных на рис. 15 графиков, наихудшие результаты отмечаются у МГО квадратного сечения (это связано с наихудшим из рассмотренных вариантов соотношением поперечных размеров сечения), а из МГО, близких к параметрам круглых отверстий, наилучшие результаты — у МГО шестиугольного сечения. Кроме того, у пазов квадратного сечения по сравнению с другими вариантами доля цвета дна выше.

Рассмотрим подробнее наиболее сложный для отображения участок с близкими к предельно допустимым значениями угла отклонения, для чего построим соответствующие графики в логарифмическом масштабе по оси ординат (рис. 16).

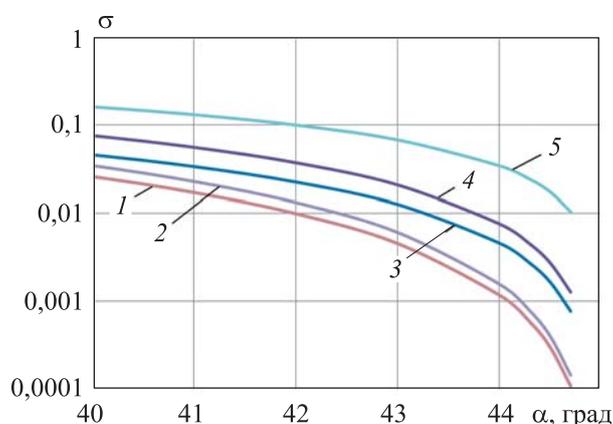


Рис. 16. Доля цвета дна отверстий и пазов при значениях угла отклонения, близких к предельно допустимым, в логарифмических координатах для цвета дна:

1 — совпадающая максимальная для МГО треугольного и квадратного сечений; 2 — максимальная для МГО шестиугольного сечения; 3, 4 — для КГО, размещенных по треугольной сетке и без учета промежутков между ними (другие способы размещения занимают промежуточные положения); 5 — для пазов квадратного сечения в направлении, перпендикулярном их продольной оси

Анализ приведенных на рис. 16 графиков показывает, что при углах отклонения, близких к предельно допустимым, КГО имеют существенное преимущество перед любыми МГО даже при расположении КГО по треугольной сетке. Еще более существенное преимущество, но реализуемое только в одной плоскости, дает применение пазов прямоугольного сечения. Из данных графиков также видно, что с учетом ограничений чувствительности зрения вероятно появление погрешностей визуального определения предельно допустимого угла отклонения порядка десятых долей градуса. Для устранения этих погрешностей возможна некоторая корректировка глубины отверстий и пазов, однако ее обоснование в рамках данной статьи рассматриваться не будет.

Опыт создания предложенных текстурированных поверхностей в ПК «КОМПАС-3D». Практический опыт создания в ПК «КОМПАС-3D» приведенных на рис. 7, 8, 10, 12 и 14 примеров текстурированных поверхностей показал, что несмотря на описанные выше теоретические преимущества, применение МГО вызывает намного более существенные вычислительные трудности, чем применение круглых отверстий. Это можно объяснить оптимизацией ПК для работы с часто встречающимися на практике круглыми отверстиями. Поэтому для текстурирования поверхностей в среде ПК «КОМПАС-3D» однозначно могут быть рекомендованы только КГО или, в вышерассмотренном случае, продольные пазы.

При этом в «КОМПАС-3D» было обнаружено несовершенство отображения углов отклонения с помощью текстурированных моделей, связанное с упрощенной реализацией перспективы, что делает невозможным проведение соответствующего эргономического анализа в этой среде.

В то же время, в ПК виртуальной реальности VR Concept показанное на рис. 7, 8, 10, 12 и 14 отображение поверхностей, текстурированных в ПК «КОМПАС-3D», проводилось достаточно хорошо вне зависимости от вида отверстий.

Для отработки предложенного способа эргономического анализа были разработаны упрощенные 3D-модели одного из вариантов КА «Бауманец-3» [19] и кантователя технологического, обеспечивающего проведение работ с КА на техническом комплексе космодрома. Основные поверхности 3D-модели КА выполнены текстурированными КГО. В связи с прямоугольной формой панелей КГО были размещены по сетке с квадратными ячейками.

Полученная модель позволила продемонстрировать возможности эргономического анализа временных рабочих мест, используемых при подготовке КА. Модель может использоваться в составе учебно-тренировочных средств при подготовке персонала к работе с КА «Бауманец-3», для эргономического анализа различных вариантов доработки наземного оборудования, а также для предварительного подбора наиболее удобных индивидуальных настроек (высоты закрепления оси поворота и угла поворота КА) при работе с КА конкретных сотрудников с их антропометрическими параметрами. Разработанная модель и результаты отображения текстурированной поверхности в ВР, подтверждающие изложенные выше рассуждения, показаны на рис. 17 и 18. На текстурированной поверхности (см. рис. 18) видна граница областей с удобными (область с красными точками) и неудобными углами наблюдения.

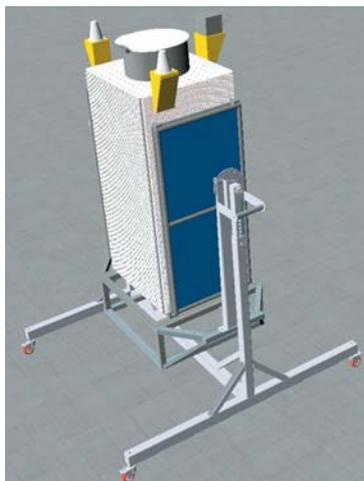


Рис. 17. Трехмерная модель кантователя технологического с КА «Бауманец-3»

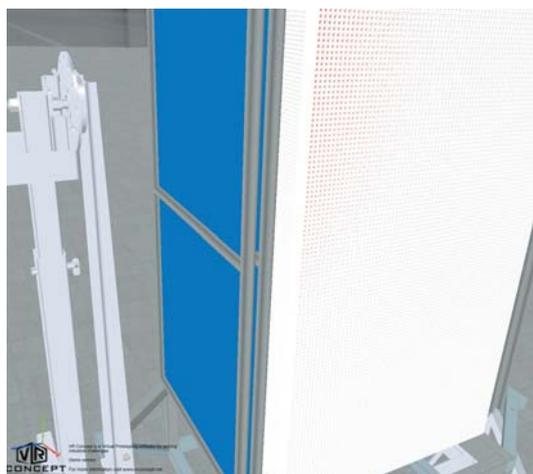


Рис. 18. Текстурированная поверхность в составе специальной 3D-модели

Обсуждение полученных результатов. Научная новизна работы состоит в предложенных способах текстурирования поверхностей для обеспечения возможности визуального определения удобства угла отклонения обслуживаемых поверхностей в ВР и ДР; в результатах анализа доли видимого сигнального цвета в зависимости от угла отклонения для предложенных способов текстурирования поверхностей, а также в выработанных на основе этих результатов рекомендациях по использованию предложенных способов в различных практических случаях.

В качестве дальнейших путей развития предложенного подхода, не рассмотренных в данной работе вследствие ограничения ее объема, следует указать:

- уточнение рациональных геометрических параметров отверстий с учетом реальных возможностей зрения в ВР и ДР, а также с учетом замены круглых отверстий на многогранные при отрисовке;
- разработка рекомендаций по рациональному выбору размера отверстий при выполнении текстурирования поверхностей.

Заключение. На основе проведенных исследований можно сделать следующие выводы.

Полученные результаты расчетов и моделирования показывают перспективность применения предложенного подхода при использовании виртуальной и дополненной реальности для эргономического анализа и в тренажерах временных рабочих мест при подготовке ракет-носителей, разгонных блоков и космических аппаратов к пуску. При этом с учетом возможностей удаленного многопользовательского доступа, реализованных в программном комплексе VR Concept [10], такие модели могут быть использованы для удаленной подготовки персонала космодрома к работе с новыми КА.

Текстурирование поверхностей для визуального определения удобства их наблюдения в виртуальной реальности следует выполнять круглыми глухими отверстиями по шестиугольной или — для прямоугольных панелей — прямоугольной сетке, так как круглые отверстия обладают целым рядом преимуществ.

В случае цилиндрических поверхностей, для которых важны только углы обзора в плоскости поперечного сечения, более рационально применение продольных пазов с сечением, близким к квадратному, в котором дно может быть закруглено для простоты задания системы таких пазов на цилиндрической поверхности.

Работа выполнена в рамках реализации программы развития передовой инженерной школы «Системная инженерия ракетно-космической техники» МГТУ им. Н.Э. Баумана.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Горбунов В.В. Эргономическая надежность самолетов разных «эргономических поколений». *Проблемы безопасности полетов*, 2014, № 6, с. 20–32.
- [2] 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. DOI: 10.18698/2308-6033-2021-4-2072
- [3] Space Launch System Core Stage. *NASA Facts*. URL: https://www.nasa.gov/sites/default/files/atoms/files/sls_core_stage_fact_sheet_04262021_508.pdf (дата обращения: 24.10.2025).
- [4] Starbase Tour and Interview with Elon Musk. *Everyday Astronaut*, 2021. URL: <https://everydayastronaut.com/starbase-tour-and-interview-with-elon-musk/> (дата обращения: 24.10.2025).
- [5] 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.

- [6] 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 им. С.А. Лавочкина*, 2015, № 1 (27), с. 10–18.
- [7] Крикалев С.К., Сапрыкин О.А. Пилотируемая лунная инфраструктура и коммерциализация полетов к Луне. *Пилотируемые полеты в космос*, 2016, № 1 (18), с. 47–62.
- [8] Горбунов А.Л. Тренажер аэродромной спецтехники. *Научный вестник МГТУ ГА*, 2016, № 225 (3), с. 92–97.
URL: <https://avia.mstuca.ru/jour/article/viewFile/880/759> (дата обращения: 16.10.2025).
- [9] Мамедов В.М. Разработка интерактивных VR-тренажеров на базе программного обеспечения VR Concept и фреймворка Ionium Collider. *International Journal of Open Information Technologies*, 2023, т. 11, № 9, с. 83–91.
URL: <http://injoit.ru/index.php/j1/article/download/1608/1530> (дата обращения: 24.10.2025).
- [10] Боброва Е.В., Говорухин А.Д., Любарский А.А., Андриенко Ю.А., Волобуева Т.Ф., Бойко О.В., Жабицкий М.Г. Реализация многопользовательского удаленного доступа через сеть Интернет к тренажерам инженерных операций в виртуальной среде VR Concept, развернутым на внутренних и внешних облачных ресурсах образовательной организации. *International Journal of Open Information Technologies*, 2024, т. 12, № 8, с. 66–75. URL: <http://injoit.ru/index.php/j1/article/download/1932/1748> (дата обращения: 24.10.2025).
- [11] Жабицкий М.Г., Кулак С.А., Новикова А.С. Проблема разработки VR тренажеров сборки/разборки и вариант высокопроизводительного решения на базе технологии VR Concept. *International Journal of Open Information Technologies*, 2022, т. 10, № 8, с. 18–29.
URL: <http://injoit.ru/index.php/j1/article/download/1368/1273> (дата обращения: 24.10.2025).
- [12] Bogar P.Z., Virag M., Bene M., Hardi P., Matuz A., Schlegl A.T., et al. Validation of a novel, low-fidelity virtual reality simulator and an artificial intelligence assessment approach for peg transfer laparoscopic training. *Scientific reports*, 2024, vol. 14 (1), art. no. 16702. DOI: 10.1038/s41598-024-67435-6
- [13] Ju U., Kim S. Predicting perceived realism in virtual reality driving simulations using participants' personality traits, heart rate changes, and risk preference. *IEEE Access*, 2024, vol. 12, pp. 12138–12148.
DOI: 10.1109/ACCESS.2024.3355439
- [14] Garg V., Singh V., Soni L. Preparing for space: How virtual reality is revolutionizing astronaut training. *2024 IEEE International Conference for Women in Innovation, Technology & Entrepreneurship (ICWITE)*, 2024, pp. 78–84. DOI: 10.1109/ICWITE59797.2024.10503238
- [15] Thach N.D., Hung N.V. Research and Design a Lifeboat Virtual Reality Simulation System for Maritime Safety Training in Vietnam. *Journal of Marine Science and Technology*, 2024, vol. 32, iss. 2, art. 4.
DOI: 10.1109/ICWITE59797.2024.10503238
- [16] Синев М.Ю., Мельничук В.Н., Зимин И.М. Дополненная реальность в процессе подготовки специалистов. *Эффективный ответ на современные вызовы с учетом взаимодействия человека и природы, человека и технологий: социально-экономические и экологические проблемы лесного комплекса: материалы XIV Международной научно-технической конференции*. Екатеринбург, Уральский государственный лесотехнический университет, 2023, с. 422–426.

- [17] Игрицкий В.А., Игрицкая А.Ю., Бондарева Ю.А., Цой М.А. Использование текстурированных поверхностей при эргономическом анализе процесса обслуживания изделий ракетно-космической техники в виртуальной реальности. *XLIX Академические чтения по космонавтике, посвященные памяти академика С.П. Королёва и других выдающихся отечественных ученых — пионеров освоения космического пространства. Сборник тезисов. Москва, 28–31 января 2025 года.* Москва, Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2025, т. 2, с. 519–520.
- [18] Скороходов Е.А., ред. *Общетеchnический справочник.* Москва, Машиностроение, 1990, 496 с.
- [19] Салиев Е.Р., Тютюнник Н.Н., Щеглов Г.А. О проектировании малого космического аппарата на основе открытой модульной архитектуры. *Космонавтика и ракетостроение*, 2019, № 1, с. 131–142.

Статья поступила в редакцию 18.11.2025

Ссылку на эту статью просим оформлять следующим образом:

Игрицкий В.А., Игрицкая А.Ю., Бондарева Ю.А., Цой М.А. Текстурирование поверхностей 3D-моделей при эргономическом анализе операций подготовки изделий ракетно-космической техники в виртуальной реальности. *Инженерный журнал: наука и инновации*, 2026, вып. 2. EDN ASMHVF

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: igrtsky_v_a@bmstu.ru

Игрицкая Анна Юрьевна — старший преподаватель кафедры «Стартовые ракетные комплексы» МГТУ им. Н.Э. Баумана. Области научных интересов: наземное оборудование ракетно-космической техники, диагностика состояния конструкций, обработка видеоматериалов. e-mail: aigri@bmstu.ru

Бондарева Юлия Александровна — студент Передовой инженерной школы МГТУ им. Н.Э. Баумана. Область научных интересов: наземное оборудование ракетно-космической техники. e-mail: bondarevayua@student.bmstu.ru

Цой Максим Александрович — студент Передовой инженерной школы МГТУ им. Н.Э. Баумана. Область научных интересов: наземное оборудование ракетно-космической техники. e-mail: tsoyma@student.bmstu.ru

Texturing 3D Model Surfaces in Ergonomic Analysis of Rocket and Space Equipment Preparation Operations in Virtual Reality

© V.A. Igritsky, A.Yu. Igritskaya, Yu.A. Bondareva, M.A. Tsoy

Bauman Moscow State Technical University, Moscow, 105005, Russian Federation

One of the main ways to improve the reliability of rocket and space technology products is to reduce the number of human errors during the preparation of these products. This can be achieved, among other things, through the use of virtual and augmented reality tools in the ergonomic analysis of temporary workplaces and the creation of training and simulation complexes. Various methods for texturing the surfaces of 3D models were proposed, allowing the angle of deviation of the surface from the position perpendicular to the line of sight to be visually determined in virtual reality, thereby highlighting easily and difficultly accessible areas of the surface according to this criterion, which is difficult to determine using other methods. A comparative analysis of the quality of highlighting easily maintainable surface areas using the proposed texturing methods was conducted, as well as their experimental testing in the KOMPAS-3D and VR Concept software packages, based on which recommendations are given for the use of the three most rational surface texturing methods in different cases.

Keywords: spacecraft preparation, rocket preparation, spacecraft maintenance, rocket maintenance, ergonomic analysis, virtual reality, virtual reality simulator

REFERENCES

- [1] Gorbunov V.V. Ergonomicheskaya nadezhnost samoletov raznykh “ergonomicheskikh pokoleniy” [Ergonomic reliability of aircraft of different “ergonomic generations”]. *Problemy bezopasnosti poletov — Flight Safety Problems*, 2014, no. 6, pp. 20–32.
- [2] Igritskiy V.A. Otsenka udobstva obsluzhivaniya elementov raket kosmicheskogo naznacheniya sverhtyazhelogo klassa pri razlichnykh tekhnologiyakh ikh podgotovki [Assessment of serviceability of superheavy-class space rocket elements using various preparation technologies]. *Inzhenerny zhurnal: nauka i innovatsii — Engineering Journal: Science and Innovation*, 2021, iss. 4. <https://doi.org/10.18698/2308-6033-2021-4-2072>
- [3] Space Launch System Core Stage. *NASA Facts*. Available at: https://www.nasa.gov/sites/default/files/atoms/files/sls_core_stage_fact_sheet_04262021_508.pdf (accessed October 24, 2025).
- [4] Starbase Tour and Interview with Elon Musk. *Everyday Astronaut*, 2021. Available at: <https://everydayastronaut.com/starbase-tour-and-interview-with-elon-musk/> (accessed October 24, 2025).
- [5] Qin T., Rong Y., Qin X., Zhang Z. The Development Characteristics and Trends of Heavy Launch Vehicles. *Aerospace China*, 2018, vol. 19, no. 4, pp. 29–37.
- [6] Danilyuk A.Yu., Klyushnikov V.Yu., Kuznetsov I.I., Osadchenko A.S. Sozdanie sverhtyazhelykh raket-nositeley dlya issledovaniya i osvoeniya Luny i Marsa: proshloe, nastoyashee, budushee [Creation of superheavy launch vehicles for Lunar and Mars exploration: past, present, future]. *Vestnik NPO im. S.A. Lavochkina*, 2015, no. 1 (27), pp. 10–18.

- [7] Krikalev S.K., Saprykin O.A. Pilotiruemaya lunnaya infrastruktura i kommertsializatsiya poletov k Lune [Manned Lunar infrastructure and commercialization of Lunar flights]. *Manned Space Flights*, 2016, no. 1 (18), pp. 47–62.
- [8] Gorbunov A.L. Trenazher aerodromnoy spetsstehniky [Simulator of airfield ground equipment]. *Nauchnyi Vestnik MGTU GA — Civil Aviation High Technologies*, 2016, no. 225 (3), pp. 92–97. Available at: <https://avia.mstuca.ru/jour/article/viewFile/880/759> (accessed October 16, 2025).
- [9] Mamedov V.M. Razrabotka interaktivnykh VR-trenazherov na baze programmno obespicheniya VR Concept i freymvorka Ionium Collider [Development of interactive VR simulators based on VR concept software and ionium collider framework]. *International Journal of Open Information Technologies*, 2023, vol. 11, no. 9, pp. 83–91. Available at: <http://injoit.ru/index.php/j1/article/download/1608/1530> (accessed October 24, 2025).
- [10] Bobrova E.V., Govorukhin A.D., Lyubarskiy A.A., Andrienko Yu.A., Volobueva T.F., Boyko O.V., Zhabitskiy M.G. Realizatsiya mnogopol'zovatel'skogo udalennogo dostupa cherez set' Internet k trenazheram inzhenernykh operatsiy v virtual'noy srede VR Concept, razvernuty na vnutrennikh i vneshnikh oblachnykh resursakh obrazovatel'noy organizatsii [Implementation of multi-user Remote Access via the Internet to engineering operation simulators in the VR Concept virtual environment, deployed on Internal and external cloud resources of an educational organization]. *International Journal of Open Information Technologies*, 2024, vol. 12, no. 8, pp. 66–75. Available at: <http://injoit.ru/index.php/j1/article/download/1932/1748> (accessed October 24, 2025).
- [11] Zhabitskiy M.G., Kulak S.A., Novikova A.S. Problema razrabotki VR trenazherov sborki/razborki i variant vysokoproizvoditel'nogo resheniya na baze tekhnologii VR Concept [Problem of developing VR assembly/disassembly simulators and a high-performance solution based on VR Concept technology]. *International Journal of Open Information Technologies*, 2022, vol. 10, no. 8, pp. 18–29. Available at: <http://injoit.ru/index.php/j1/article/download/1368/1273> (accessed October 24, 2025).
- [12] Bogar P.Z., Virag M., Bene M., Hardi P., Matuz A., Schlegl A.T., et al. Validation of a novel, low-fidelity virtual reality simulator and an artificial intelligence assessment approach for peg transfer laparoscopic training. *Scientific Reports*, 2024, vol. 14, no. 1, art. no. 16702. <https://doi.org/10.1038/s41598-024-67435>
- [13] Ju U., Kim S. Predicting perceived realism in virtual reality driving simulations using participants' personality traits, heart rate changes, and risk preference. *IEEE Access*, 2024, vol. 12, pp. 12138–12148. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2024.3355439>
- [14] Garg V., Singh V., Soni L. Preparing for space: How virtual reality is revolutionizing astronaut training. In: *2024 IEEE International Conference for Women in Innovation, Technology & Entrepreneurship (ICWITE)*, 2024, pp. 78–84. <https://doi.org/10.1109/ICWITE59797.2024.10503238>.
- [15] Thach N.D., Hung N.V. Research and Design a Lifeboat Virtual Reality Simulation System for Maritime Safety Training in Vietnam. *Journal of Marine Science and Technology*, 2024, vol. 32, iss. 2, art. no. 4. <https://doi.org/10.1109/ICWITE59797.2024.10503238>
- [16] Sinev M.Yu., Melnichuk V.N., Zimin I.M. Dopolnennaya real'nost' v protsesse podgotovki spetsialistov [Augmented reality in specialist training]. In:

- Effektivniy otvet na sovremennyye vyzovy s uchetom vzaimodeystviya cheloveka i prirody, cheloveka i tekhnologii: sotsial'no-ekonomicheskie i ekologicheskie problemy lesnogo kompleksa: Materialy XIV Mezhdunarodnoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii* [An effective response to contemporary challenges considering human–nature and human–technology interaction: socio-economic and environmental issues of the forestry sector: Proceedings of the XIV International scientific and technical conference]. Yekaterinburg, Ural State Forest Engineering University, 2023, pp. 422–426.
- [17] Igritskiy V.A., Igritskaya A.Yu., Bondareva Yu.A., Tsoy M.A. Ispolzovanie teksturirovannykh poverkhnostey pri ergonomicheskoy analize protsessa obsluzhivaniya izdeliy raketno-kosmicheskoy tekhniki v virtual'noy real'nosti [Use of textured surfaces in ergonomic analysis of the maintenance process of space rocket products in virtual reality]. In: *XLIX Akademicheskie chteniya po kosmonavtike, posvyashchennye pamyati akademika S.P. Korolyova i drugih vydaushchikhsya otechestvennykh uchenykh — pionerov osvoiniya kosmicheskogo prostranstva. Sbornik tezisov* [XLIX academic readings on cosmonautics, dedicated to the memory of academician S.P. Korolev and other outstanding national scientists — pioneers of space exploration. Collection of abstracts]. Moscow, January 28–31, 2025. Moscow, Bauman Press, 2025, vol. 2, pp. 519–520.
- [18] Skorokhodov E.A., ed. *Obshtekhnicheskyy spravochnik* [General technical handbook]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1990, 496 p.
- [19] Saliev E.R., Tyutyunnik N.N., Scheglov G.A. O proektirovanii malogo kosmicheskogo apparata na baze otkrytoy modul'noy arkhitektury [On designing a small spacecraft based on an open modular architecture]. *Kosmonavtika i raketostroenie*, 2019, no. 1, pp. 131–142.

Igritskiy V.A., Cand. Sc. (Eng.), Associate Professor, Department of Launch Vehicle Systems, Bauman Moscow State Technical University. Areas of scientific interest: ground equipment for rocket and space technology, spacecraft, and educational space technologies. e-mail: igritskiy_v_a@bmstu.ru

Igritskaya A.Yu., Senior Lecturer, Department of Launch Vehicle Systems, Bauman Moscow State Technical University. Research interests: ground support equipment for space systems, structural condition diagnostics, video data processing. e-mail: aigri@bmstu.ru

Bondareva Yu.A., Student, Advanced Engineering School, Bauman Moscow State Technical University. Research interests: ground support equipment for space systems. e-mail: bondarevayua@student.bmstu.ru

Tsoy M.A., Student, Advanced Engineering School, Bauman Moscow State Technical University. Research interests: ground support equipment for space systems. e-mail: tsoyma@student.bmstu.ru