

УДК 62-231.1:62-236.58:67.05

## ОБОСНОВАНИЕ И ВЫБОР КИНЕМАТИЧЕСКОЙ СТРУКТУРЫ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО МАНИПУЛЯТОРА ГИДРОРЕЗАНИЯ НЕФТЕПРОВОДОВ

**Кобзев А.А., Махфуз А.А., Лекарева А.В.**

*Владимирский государственный университет имени Александра Григорьевича  
и Николая Григорьевича Столетовых, Владимир, e-mail: kobzev42@mail.ru*

Настоящая статья посвящена вопросу разработки кинематической структуры технологического манипулятора гидрорезания нефтепроводов и связанных с ними нефтехранилищ. При выборе кинематической схемы специализированного манипулятора гидрорезания необходим анализ и учет следующих факторов: вид, геометрические размеры объекта резания; вид, размеры и математическое описание вырезаемых полостей; расположение вырезаемых поверхностей на поверхности объекта резания; расположение технологического робота относительно базовой поверхности транспортного робота, объекта и поверхности резания; вид технологических траекторий; необходимость ориентации струи гидрореза по нормали к поверхности или под другим углом; пространственные ограничения со стороны объекта и прилегающих элементов конструкции. Анализ типовых схем манипуляторов применительно к рассматриваемому процессу показал, что наиболее целесообразным является применение трехзвенного или четырехзвенного манипулятора, работающего в ангулярной сферической системе координат. Одно из условий выполнения технологического процесса гидрорезания состоит в постоянном расположении оси струи по нормали к обрабатываемой поверхности. В техническом плане для обеспечения перпендикулярности в точке резания и организации поисковых движений в режимах ориентации и согласования осей технологического робота и объекта резания исполнительная система манипулятора должна иметь три управляемые координаты. На основании графоаналитического анализа для трех вариантов расположения объектов резания (наземные и подземные нефтепроводы, нефтехранилища) и выбранной кинематической структуры определены оптимальные геометрические параметры звеньев кинематической цепи манипулятора. Анализ рабочих зон в формате 3D показал, что выбранная кинематика манипулятора и геометрические параметры звеньев обеспечивают резание наземных трубопроводов и нефтехранилищ с заданными фигурами резания и их размерами. Для резания нефтепроводов, расположенных в траншее (вскрытые подземные нефтепроводы), следует увеличить размеры звеньев.

**Ключевые слова:** гидрорезание, нефтепровод, технологический манипулятор, кинематическая структура, ангулярная система координат, графоаналитический анализ, рабочая зона

## RATIONALE AND SELECTION KINEMATIC STRUCTURE OF THE MANIPULATOR HYDROCUTTING PIPELINES

**Kobzev A.A., Makhfuz A.A., Lekareva A.V.**

*Vladimir State University of a name of A.G. and N.G. Stoletovs, Vladimir, e-mail: kobzev42@mail.ru*

This article is devoted to the development of the kinematic structure of waterjet cutting technology manipulator pipelines and associated storage tanks. When choosing a dedicated manipulator kinematic scheme waterjet cutting needs analysis and taking into account the following factors: the type, the geometric dimensions of the cutting object; form, dimensions and mathematical description of cut cavities; the location of the cut-out surfaces on the cutting surface of the object; location technology of the robot relative to the base surface of the transport robot, the object and the cutting surface; kind of technological trajectories; need manipulator jet orientation normal to the surface or at a different angle; spatial restrictions imposed by the object and the surrounding structural elements. Analysis of typical schemes of manipulators with reference to the process in question has shown that the most appropriate is the use of three-link or the four-arm, working in angular spherical coordinate system. One of the conditions for carrying out the process waterjet cutting process is a constant jet axis arrangement along a normal to the surface being treated. In technical terms, to ensure squareness at the point of cutting and organization of search movements in the modes of orientation and alignment of the axes of the robot and the technological object of cutting the executive arm system should be managed by three coordinates. Based on the graphic-analytical analysis for the three location options of cutting objects (surface and underground pipelines, storage tanks) and the chosen kinematic structure of the optimal geometric parameters of parts of the kinematic chain manipulator. Analysis workspaces in 3D showed that the selected manipulator kinematics and geometric parameters of cutting units provide onshore pipelines and storage tanks with desired shapes and sizes of cut. For cutting oil pipelines located in the trench (opening of underground pipelines), increase the size of the links.

**Keywords:** waterjet cutting, oil, technological manipulator, kinematic structure, the angular coordinate system, graphic-analytical analysis, work area

Ежегодное расширение нефтегазовых магистралей (анализ показывает, что эксплуатационная длина нефте- и газопроводов ежегодно увеличивается в среднем на 3–5 тыс. км), а также существенность постоянного и тщательного контроля за их состоянием и наличие опасных факторов

значительно обостряют вопросы необходимости повышения автоматизации проведения контрольно-профилактических и ремонтных мероприятий с целью сокращения временных, финансовых затрат и трудовых затрат. В частности, мероприятия по обслуживанию нефтегазовых магистралей сопряжены

с вырезанием на их поверхности полостей больших размеров и сложной формы, что в настоящее время осуществляется непосредственно оператором с помощью специальных приспособлений, устанавливаемых на поверхностях резания и несущих головку гидрореза и систему подвода воды с абразивом.

Для реализации процесса автоматизации гидрорезания целесообразно применение специально адаптированного с учетом специфики выполняемого технологического процесса, а также ограничений со стороны объекта и внешней среды, мобильного робототехнического комплекса (МРК). Данный комплекс состоит из транспортного мобильного робота и расположенного на нем технологического робота (ТР), в схвате или специальном приспособлении которого находится головка гидрорезания струей жидкости с абразивом [1].

Отправной точкой при разработке робототехнического комплекса гидрорезания является разработка кинематической структуры технологического манипулятора, а также определение геометрических параметров звеньев. При структурном синтезе механизма манипулятора необходимо учитывать следующее:

1) кинематические пары манипулятора снабжаются приводами, включающими двигатели и тормозные устройства, поэтому в схемах манипуляторов обычно используются одноподвижные кинематические пары: вращательные или поступательные;

2) необходимо обеспечить не только заданную подвижность схвата манипулятора, но и такую ориентацию осей кинематических пар, которая обеспечивала необходимую форму зоны обслуживания, а также простоту и удобство программирования его движений;

3) при выборе ориентации кинематических пар необходимо учитывать расположение приводов (на основании или на подвижных звеньях), а также способ уравновешивания сил веса звеньев;

4) необходимо учитывать габаритные размеры и конфигурацию технологического объекта, расположение вырезаемых поверхностей и полостей.

Процесс гидроабразивной резки относится к категории гибридных. Рабочим инструментом, или рабочим телом, здесь является водная струя с абразивом, но в то же время по конструктиву инструмент не представляет единое жесткое тело. Он состоит из двух ничем между собой не связанных физически, механически и химически разнородных материалов, находящихся в одном объеме и пере-

мещающихся под действием высокого давления при истечении из сопла [9].

Исходными при выборе кинематики нефтепроводов и нефтехранилищ являются данные, определенные в работе [1]. Систематизируем эти данные и сведения в табл. 1. Одним из специфических и сложных конструкторских вопросов является выполнение трубопроводов высокого давления, подводящих рабочее тело к соплу гидрореза. В этом плане желательно минимальное число звеньев робота.

Анализ обозначенных объектов резания свидетельствует о проблематичности создания универсального ТР. Следует определить требования для каждого случая, выбрать базовую кинематику, размеры плеч и проанализировать варианты их совместимости с позиции возможной реализации.

Вопросы выбора кинематики рассмотрены достаточно широко в различных источниках [3–4, 8, 10]. В работах [5–6] приведены результаты выбора кинематики при наличии ограничений в рабочем пространстве. В данном случае ТР при выполнении технологического процесса:

1) расположен на неподвижном основании (платформе транспортной системы или мобильного робота);

2) работает с объектами, имеющими вполне определенную форму;

3) ограничения в пространстве взаимодействия робота с объектом отсутствуют.

Поэтому воспользуемся наиболее простой и близкой методикой выбора кинематики, приведенной в работе [2]. В работе приведены 18 характерных кинематических схем, даны их рабочие зоны и аналитические зависимости. Среди большого многообразия компоновок манипуляторов промышленных роботов можно выделить шесть основных, наиболее часто применяемых: сферическая – одна из первых компоновок, при которой устройство управления, как правило, объединено с корпусом манипулятора; цилиндрическая – достаточно распространенная компоновка, часто встречающаяся в легких и средних промышленных роботах; рычажная (антропоморфная) – перспективная компоновка, удельный вес которой постоянно возрастает; прямоугольная – отличается относительно высокой жесткостью и точностью; горизонтально-плечевая; порталная. Анализ типовых схем манипуляторов применительно для рассматриваемого процесса гидрорезания показал, что наиболее целесообразным является применение трехзвенного или четырехзвенного манипулятора, работающего в ангулярной сферической системе координат.

Таблица 1

Параметры объектов резания и основные требования, предъявляемые к процессу гидрорезания нефтепроводов

№ п/п	Параметр	Значение
1	Расположение нефтепроводов относительно уровня поверхности: а) наземные б) подземные в) надземные	< 1–2 м > 2–4 м
2	Диаметр труб, мм	200–1200
3	Диаметр и высота нефтехранилищ, мм	10000, 5000
4	Профили вырезаемых поверхностей нефтепроводов при виде по нормали к поверхности: а) прямоугольник с максимальными размерами, мм×мм б) окружность с радиусом, мм	400×1200 600
5	Профили вырезаемых поверхностей на нефтехранилище при виде по нормали к поверхности: прямоугольник с максимальными размерами, мм×мм	4000×3000
6	Расстояние кромки передней плоскости носителя от поверхности трубы, мм	300–500
7	Начальное отклонение платформы носителя от плоскости горизонта по осям X, Y, град	15
8	Расстояние среза сопла от поверхности резания, мм	4–5
9	Точность стабилизации расстояния от поверхности, мм	1
10	Отклонение линии реза от заданного профиля, мм	2
11	Допустимая неперпендикулярность оси струи относительно поверхности резания, град	5
12	Возможность обеспечения наклона оси струи относительно поверхности резания, град	±30
13	Исходная непараллельность продольной оси носителя и трубы, град	±10
14	Отклонение линии реза от заданного профиля, мм	10
15	Флуктуации поверхности резания (минидеформации, загрязнение, сварной шов), мм	2–5

Одно из условий выполнения технологического процесса гидрорезания состоит в постоянном обеспечении оси струи по нормали к обрабатываемой поверхности. В техническом плане для обеспечения перпендикулярности в точке резания и организации поисковых движений в режимах ориентации и согласования осей ТР и объекта резания [7] исполнительная система манипулятора должна иметь три управляемые координаты. Две из них – углы качания  $\alpha$ ,  $\beta$  относительно горизонтальных осей X, Y, третья – вращение относительно продольной оси.

Для выполнения поисковых движений и с целью стабилизации расположения струи по нормали к поверхности используем измерительную систему типа дифференциальной вилки [7]. В нашем случае измерительная система состоит из двух ультразвуковых датчиков, расположенных на штанге, перпендикулярной к продольной оси звена 4. Датчики расположены симметрично относительно центра штанги, ось которой совмещена с продольной осью струи. Особенностью этой измерительной системы является вклю-

чение в ее состав объекта контроля – поверхности объекта резания (трубы).

Таким образом, манипулятор должен обладать шестью степенями подвижности ( $q_1 \dots q_6$ ). Упрощенная кинематическая схема ТР с обозначениями систем координат звеньев представлена на рис. 1.

Функционально кинематическую схему разделим на две системы – несущую (НС) и исполнительную (ИС) (рис. 2). На схеме обозначено: СЧ1–СЧ5 – силовые части звеньев манипулятора, включающие исполнительный двигатель, механическую передачу и конструкции плеч звеньев. Несущая система состоит из звеньев  $L_1-L_3$ , с соответствующими обобщенными координатами (угловыми)  $q_1, q_2, q_3$ . Конечная точка звена 3 выполняет программное движение по эквидистанте фигуры резания. Исполнительная система представляет звено 4 с тремя степенями подвижности, обобщенные координаты (угловые)  $q_4, q_5$  и  $q_6$ . Это звено и соответствующая ему управляемая система координат обеспечивают ориентацию головки гидрореза, реализуя движение по нормали к поверхности резания.

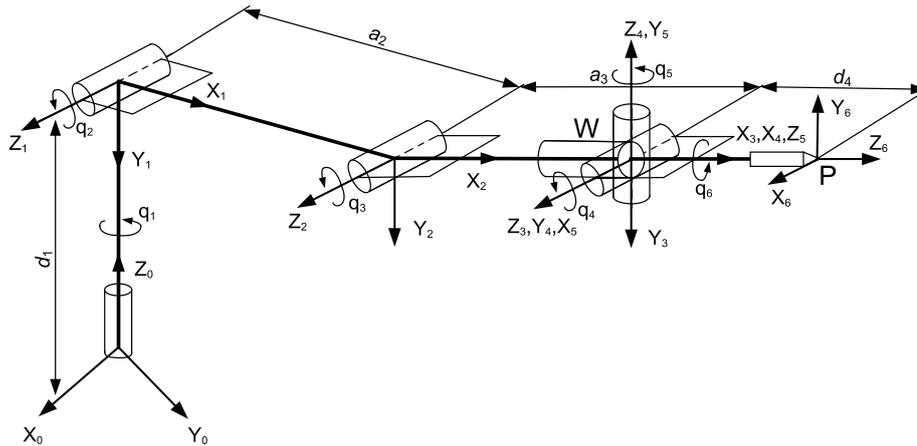


Рис. 1. Схематическое изображение манипулятора и его систем координат в сочленениях

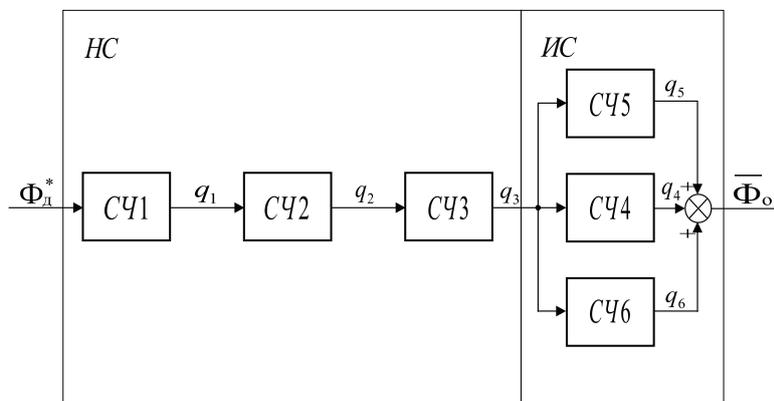


Рис. 2. Функциональная схема манипулятора

Рассмотрим геометрию взаимного расположения плеч робота и объекта резания (трубы) с целью определения рациональных размеров плеч и рабочих углов ТР для трех случаев – резание наземных и подземных нефтепроводов, а также нефтехранилищ.

### Случай 1. Резание наземных нефтепроводов

Рассматриваем резание труб наибольшего диаметра 1200 мм с вырезанием окружностей радиусом 330 мм, как наиболее характерного. Процесс рассматриваем в вертикальной плоскости, перпендикулярной продольной оси трубы. На рис. 3, а, б представлены расположения звеньев в варианте трехзвенника и четырехзвенника для двух наиболее характерных вариантов расположения точки начала резания. Проведенный геометрический анализ свидетельствует об избыточности применения кинематической цепи с четырьмя звеньями.

Следует отметить, что задача выбора размеров звеньев и рабочих углов для каждого из плеч ТР относительно их осей вращения в данном случае является непростой задачей. Здесь накладываются следующие ограничения:

- внутри рабочей зоны располагается недоступная зона с сечением в вертикальной плоскости вида окружность;
- расположение базовой поверхности, на которой располагается ТР, определяется конструкцией носителя (верхний уровень расположения и расстояния ТР от крайней точки носителя) и рельефом местности в зоне нефтепровода;
- величина расстояния носителя от объекта резания (трубы) обусловлена минимальным возможным расположением мобильного робота от любой преграды. Это значение принято в диапазоне 300–500 мм;
- одно из условий выполнения технологического процесса гидрорезания состоит в необходимости постоянного обеспечения оси струи по нормали к обрабатываемой поверхности.

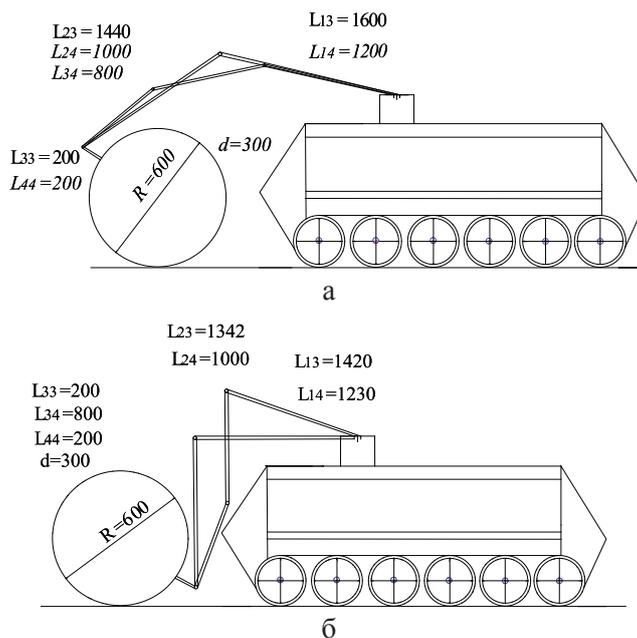


Рис. 3. Расположение МТР и трубы нефтепровода

В аналитическом плане решение этой задачи имеет определенные трудности. Известные подходы [5–6] при этом весьма сложны. Наиболее простым подходом является графоаналитический анализ, исходя из которого и определялись основные геометрические характеристики звеньев кинематической цепи. На рис. 3 показаны наиболее рациональные размеры плеч. При графической оптимизации эти размеры варьировались в диапазоне  $\pm 50\%$ . Для реализации резания из любой из трех начальных точек принимаем большие значения линейных размеров плеч манипулятора:  $L_{13} = 1600$  мм,  $L_{23} = 1440$  мм,  $L_{33} = 200$  мм. Параметр  $d$  на рисунках – расстояние между крайней точкой расположения носителя относительно объекта резания и образующей поверхности трубопровода. Высота платформы носителя, на которой расположен ТР, составляет 1250 мм, длина первого звена ТР – 400 мм).

### Случай 2. Резание открытых подземных нефтепроводов в траншее

Расположение МРК и нефтепровода для двух характерных точек начала резания и, соответственно, расположения фигур резания приведены на рис. 4.

В этом случае необходимы разные длины плеч, отличные по размерам от случая резания трубы наземного нефтепровода:  $L_{13} = 2230$  мм,  $L_{23} = 3057$  мм,  $L_{33} = 200$  мм. Второе плечо требуется большей длины, чем

первое. Это противоречит классической компоновке манипуляторов рассматриваемой кинематики. Возможно использование телескопического исполнения этого звена. Однако это усложняет всю конструкцию и делает проблематичным реализацию здесь системы трубопроводов высокого давления, подводящих воду и абразив к соплу резания, расположенному в схвате манипулятора.

### Случай 3. Резание нефтехранилищ

Вариант исполнения нефтехранилища: резервуар стальной вертикальный. Объектом резания является нефтехранилище в виде цилиндра с диаметром 7000 и 5000 мм высотой. При резании прямоугольных поверхностей с размерами относительно земной поверхности 4000×3000 мм приемлема кинематика и размеры плеч, определенные для варианта резки наземных нефтепроводов.

На основе проведенного анализа для варианта резания поверхностей в виде:

- 1) прямоугольников с размерами 600×800 мм и окружностей с диаметром до 800 мм на наземных трубопроводах с максимальным диаметром труб 1200–1600 мм;
- 2) прямоугольников с размерами до 4000×3000 мм на нефтехранилищах в виде цилиндра с диаметром 7000 мм и высотой 5000 мм могут быть рекомендованы геометрические параметры звеньев кинематической цепи технологического робота, приведенные в табл. 2.

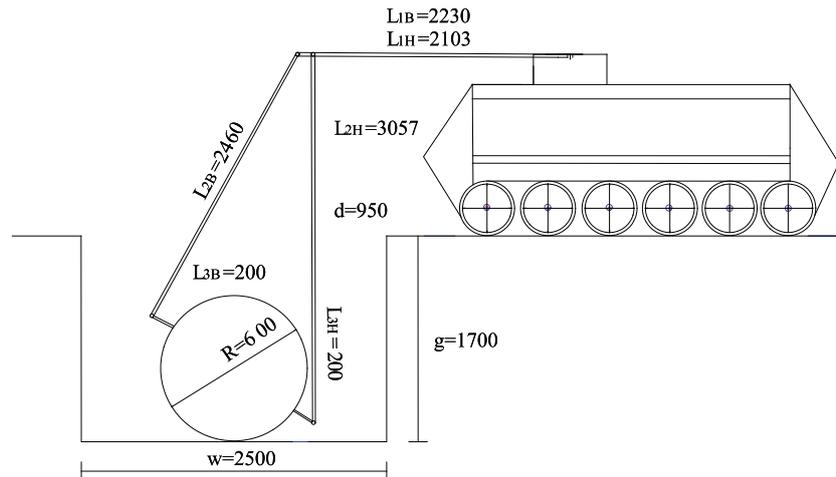


Рис. 4. Расположение МТП и трубы нефтепровода в траншее

Таблица 2

Геометрические параметры звеньев кинематической цепи технологического робота

Звено	Длина плеча, мм	Угол качания, относительно продольной оси предыдущего звена, град	Примечание
1	400	$-90 \leq q_1 \leq 90$	Вращение относительно вертикальной оси
2	1600	$0 \leq q_2 \leq 90$	Исходное положение – горизонтальное
3	800–1440	$-90 \leq q_3 \leq 0$	Исходное положение – горизонтальное
4	200–400	$-135 \leq q_4 \leq 135$	Качение относительно оси X
4	200–400	$-30 \leq q_5 \leq 30$	Качение относительно оси Y
4	200–400	$-90 \leq q_6 \leq 90$	Вращение относительно продольной оси звена

Для оценки пространственного расположения звеньев манипулятора в формате 3D осуществлено построение рабочих зон ТР в программном продукте SimMechanics. При построении рабочих зон манипулятор располагается в штатном режиме на платформе несущей транспортной системы. На рис. 5, а приведена рабочая зона комплекса «несущая система (транспортный робот) – технологический робот – объект резания» для варианта резки наземного нефтепровода с диаметром трубы 1200 мм. На рис. 5, б дана форма объема рабочей зоны в формате 3D.

Выбранные кинематика манипулятора и размеры звеньев обеспечивают выполнение технологического процесса резки нефтепроводов в виде труб с максимальным диаметром 1200 мм при расположении фигуры перпендикулярно продольной оси по максимальным размерам трубы в вертикальной и горизонтальной плоскостях. При

резке прямоугольных сечений нефтехранилищ цилиндрической формы обеспечивается максимальная высота верхней линии резки 3000 мм с учетом высоты несущей платформы 1200 мм. Для вырезания прямоугольника с размерами 3000×4000 мм необходимо переустанавливать несущую платформу (мобильный робот) с шагом 1000 м.

На рис. 6, а, б приведены рабочая зона и форма объема рабочей зоны в формате 3D, при резке трубопроводов в траншее (вскрытые подземные трубопроводы). Здесь, как уже отмечалось выше, требуются другие размеры звеньев манипулятора.

### Выводы

1. Создание универсального многоцелевого ТР для резки наземных, подземных и расположенных на воздушных эстакадах нефтепроводах нерационально, так как требует сложных кинематических схем и больших размеров звеньев.



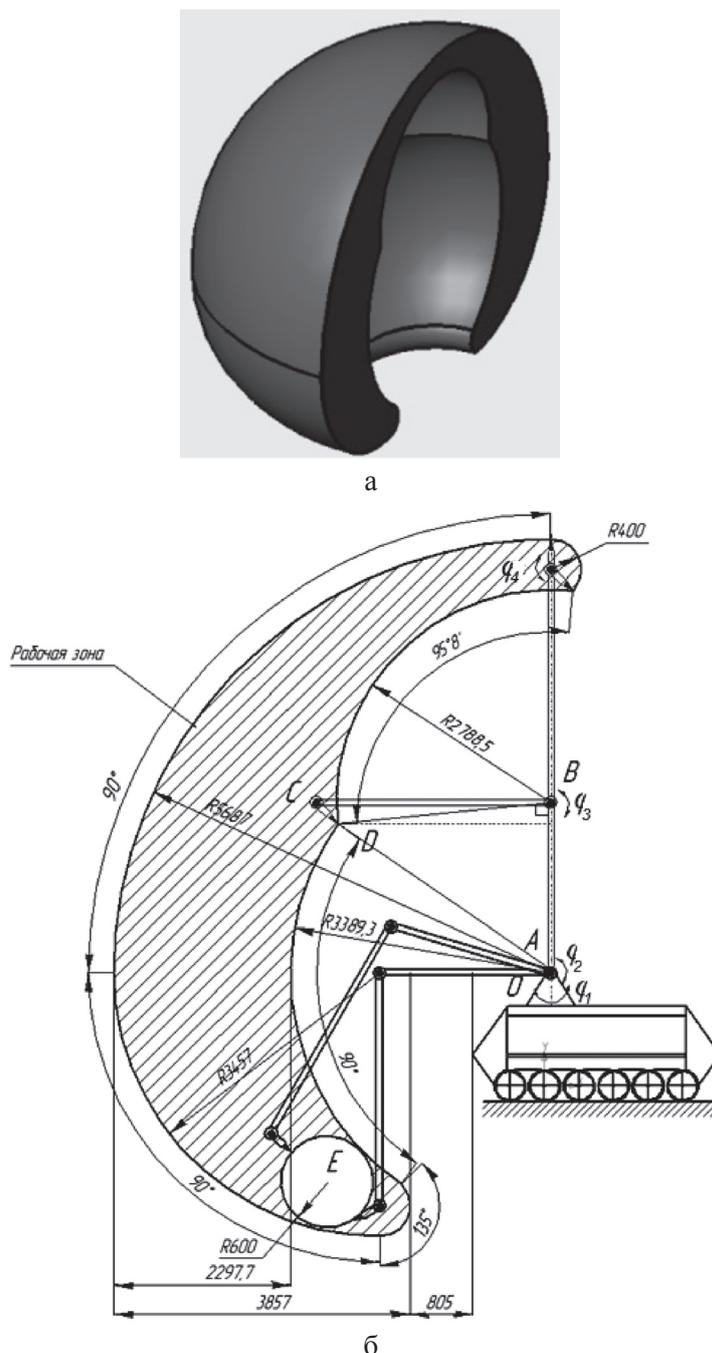


Рис. 6:

*а – рабочая зона в 3D технологического робота с транспортным средством для резки нефтепроводов в траншее; б – рабочая зона технологического робота с транспортным средством для резки нефтепроводов в траншее (вскрытые подземные нефтепроводы)*

5. Анализ рабочих зон в формате 3D показал, что выбранная кинематика манипулятора ТР и размеры звеньев обеспечивают резание наземных трубопроводов и нефтехранилищ с заданными фигурами резания и их размерами. Для резания нефтепроводов, расположенных в траншее (вскрытые подземные нефтепроводы), следует увеличить размеры звеньев.

#### Список литературы

1. Анализ роботизации процесса гидрорезания нефтепроводов / А.Н. Архипов, А.А. Кобзев, А.В. Лекарева, А.А. Махфуз, Е.Н. Петухов // Современные проблемы науки и образования. – 2014. – № 6. – URL: <http://www.science-education.ru/120-15697> (дата обращения: 12.09.16).
2. Бабич А.В. Промышленная робототехника / А.В. Бабич, А.Г. Баранов, И.В. Калабин; под ред. Я.А. Шифрина. – М.: Машиностроение, 1982. – 415 с.

3. Лукинов А.П. Проектирование мехатронных и робототехнических устройств: учебное пособие. – СПб.: Лань, 2012. – 608 с. – ISBN 978-5-8114-1166-5.

4. Пол Р. Моделирование, планирование траекторий и управление движением робота-манипулятора. – М.: Наука, 1976. – 104 с.

5. Притыкин Н.Ф. Синтез малых движений мобильного манипулятора заданной траектории выходного звена с наложением условий на движение отдельных точек звеньев механизма, контактирующего с препятствиями // Мехатроника, автоматизация, управление. – 2004. – № 4. – С. 31–40.

6. Притыкин Н.Ф. Методы и технологии виртуального моделирования движений адаптивных роботов с использованием средств компьютерной графики // Мехатроника, автоматизация, управление. – 2011. – № 6. – С. 34–41.

7. Согласование осей объекта и манипулятора при гидрорезании нефтепроводов / А.А. Кобзев, А.Н. Архипов, Е.В. Еропова, А.В. Лекарева, А.А. Махфуз // Фундаментальные исследования. – 2015. – № 2. – С. 5329–5334.

8. Шахинпур М. Курс робототехники. – М.: Мир, 1990. – 527 с. – ISBN 5-03-001375-x.

9. Ющенко А.С. Интеллектуальное планирование в деятельности роботов // Мехатроника, автоматизация, управление. – 2005. – № 3. – С. 5–18.

10. Юревич Е.И. Основы робототехники. – СПб.: БХВ – Петербург, 2010. – 368 с.

### References

1. Arhipov A.N., Kobzev A.A., Lekareva A.V., Mahfuz A.A., Petuhov E.N. *Analiz robotizacii processa gidrorezaniya nefteprovodov* [Analysis robotics waterjet cutting process oil]. *Sovremennye problemy nauki i obrazovaniya: jelektronnyj nauchnyj zhurnal*, 2014, no. 6. URL: <http://www.science-education.ru/120-15697> (дата обращения: 12.09.16).

2. Babich A.V., Baranov A.G., Kalabin I.V. *Promyshlennaja robototekhnika* [Industrial robotics]. Moscow, Engineering, 1982, 451 p.

3. Lukinov A.P. *Proektirovanie mehatronnyh i robototekhnicheskij ustrojstv* [Designing mechatronic and robotic devices]. St. Petersburg, Doe, 2012, 608 p. ISBN 978-5-8114-1166-5.

4. Pol R. *Modelirovanie, planirovanie traektorij i upravlenie dvizheniem robota-manipuljatora* [Simulation trajectory planning and control a robotic arm movement]. Moscow, Science, 1976, 104 p.

5. Pritykin N.F. *Sintez malyh dvizhenij mobilnogo manipuljatora zadannoj traektorii vyhodnogo zvena s nalozheniem uslovij na dvizhenie otdelnyh toček zvenev mehanizma, kontaktirujushhego s prepjatstvijami* [The synthesis of small movements of the mobile arm a predetermined path of the output level with the imposition of conditions on the movement of certain points of the mechanism units in contact with obstacles]. *Mehatronika, avtomatizacija, upravlenie*, 2004, no. 4, pp. 31–40.

6. Pritykin N.F. *Metody i tehnologii virtualnogo modelirovanija dvizhenij adaptivnyh robotov s ispolzovaniem sredstv kompjuternoj grafiki* [Methods and technologies of virtual simulation of adaptive robots movements with the use of computer graphics]. *Mehatronika, avtomatizacija, upravlenie*, 2011, no. 6, pp. 31–41.

7. Kobzev A.A., Arhipov A.N., Eropova E.V., Lekareva A.V., Mahfuz A.A. *Soglasovanie osey ob#ekta i manipuljatora pri gidrorezanii nefteprovodov* [Matching axes manipulator with an object and waterjet pipelines]. *Fundamentalnye issledovanija*, 2015, no. 2, pp. 5329–5334. URL: <http://fundamental-research.ru/ru/article/view?id=38344>.

8. Shahinpur M. *Kurs robototekhniki* [Robotics course]. Moscow, Peace, 1990, 527 p. ISBN 5-03-001375-x.

9. Jushhenko A.S. *Intellektualnoe planirovanie v dejatelnosti robotov* [Intelligent planning for robotic activity]. *Mehatronika, avtomatizacija, upravlenie*, 2005, no. 3, pp. 5–18.

10. Jurevich E.I. *Osnovy robototekhniki* [Fundamentals of robotics]. St. Petersburg, 2010, 368 p.