



НАУЧНЫЙ ПОТЕНЦИАЛ МОЛОДЕЖИ И ТЕХНИЧЕСКИЙ ПРОГРЕСС

Материалы VIII Всероссийской научно-практической конференции

Санкт-Петербург, 15 мая 2025 г.

УДК 082 : 001.8
ББК 94.3
Н34

ISSN 2618-7493

Научный потенциал молодежи и технический прогресс: материалы VIII Всероссийской научно-практической конференции. – Санкт-Петербург: НИЦ МС, 2025. – 31 с. – DOI: 10.26160/2618-7493-2025-8.

Оргкомитет:

Балакина Екатерина Викторовна – д.т.н., доцент, профессор кафедры «Техническая эксплуатация и ремонт автомобилей», Волгоградский государственный технический университет, г. Волгоград;

Жуков Иван Алексеевич – д.т.н., доцент, заведующий кафедрой машиностроения, Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II, г. Санкт-Петербург;

Кугаевский Сергей Семенович – к.т.н., доцент, доцент кафедры «Технологии машиностроения, станки и инструменты», Уральский федеральный университет им. первого Президента России Б.Н. Ельцина, г. Екатеринбург;

Плотников Сергей Михайлович – д.т.н., доцент, профессор кафедры «Системы обеспечения движения», Красноярский институт железнодорожного транспорта – филиал Иркутского государственного университета путей сообщения, г. Красноярск;

Солодовников Александр Юрьевич – д.г.н., доцент, начальник научно-исследовательского отдела Экологии, Тюменское отделение «СургутНИПИнефть», г. Тюмень;

Тараховский Алексей Юрьевич – к.т.н., доцент, заведующий кафедрой «Цифровое проектирование», Севастопольский государственный университет, г. Севастополь;

Шигин Андрей Олегович – д.т.н., доцент, профессор кафедры «Горные машины и комплексы», Сибирский федеральный университет, г. Красноярск;

Якубович Ефим Абрамович – к.т.н., доцент, профессор кафедры «Металловедение, порошковая металлургия, наноматериалы», Самарский государственный технический университет, г. Самара.

Формат издания 60x84/8. Усл. печ. л. 1,80.

Подписан в печать 15.05.2025г. Заказ №25-10.

<https://doi.org/10.26160/2618-7493-2025-8>

Учредитель, издатель и распространитель: Жукова Елена Валерьевна
(ИП Жукова Е.В., ИНН 422802805198, ОГРНИП 318420500009778, г. Санкт-Петербург).

Ответственный редактор: Жуков Иван Алексеевич.

Редакция: Научно-исследовательский центр «МашиноСтроение»,
197372, г. Санкт-Петербург, пр. Комендантский, д. 28, корп. 2, оф. 117.
<http://srcms.ru/> Е-mail: spbf@srcms.ru

**Научно-исследовательский центр «МашиноСтроение»
(НИЦ МС)**

представляет сборник трудов Всероссийской научно-практической конференции

«НАУЧНЫЙ ПОТЕНЦИАЛ МОЛОДЕЖИ И ТЕХНИЧЕСКИЙ ПРОГРЕСС»

ISSN 2618-7493

К публикации принимаются доклады, тезисы, обзоры и краткие сообщения по результатам учебных и научных работ студентов, аспирантов, молодых ученых, их коллег и руководителей. Сборник трудов размещается в полнотекстовом режиме на сайте Научной электронной библиотеки: <http://elibrary.ru>. Все материалы проходят проверку на антиплагиат и «слепое» рецензирование.

Секции конференции:

1. Архитектура, техника и технологии строительства
2. Аэронавигация, авиационная и ракетно-космическая техника
3. Компьютерные и информационные науки, информатика и вычислительная техника
4. Математика и механика
5. Машиностроение
6. Науки о земле, прикладная геология, горное дело, нефтегазовое дело и геодезия
7. Приборостроение, оптические и биотехнические системы и технологии
8. Сельское, лесное и рыбное хозяйство
9. Техника и технологии наземного транспорта
10. Технологии легкой промышленности
11. Технологии материалов, нанотехнологии и материалы
12. Техносферная безопасность и природообустройство
13. Управление в технических системах
14. Физика и астрономия
15. Физико-технические науки и технологии
16. Химия и химические технологии
17. Электро- и теплоэнергетика
18. Электроника, радиотехника и системы связи

Требования к оформлению:

Материалы необходимо подготовить с применением редактора MS Word (doc, docx). Минимальный объем: 3 страницы. Формат страницы: А4. Ориентация: книжная. Поля: со всех сторон – 2,5см. Шрифт: Times New Roman. Кегль: размер основного кегля – 14, абзац – 1,25см, межстрочный интервал – одинарный. Расстановка переносов не допускается. В текст статьи включаются ключевые слова и аннотация (размер шрифта 12). Формулы: набираются с использованием встроенного редактора формул со стандартными размерами по умолчанию: основной – 12, крупный индекс – 7, мелкий индекс – 5, крупный символ – 18, мелкий символ – 12. Максимальный размер рисунка по ширине – 11см. Список литературы должен содержать минимум 3 источника. В конце приводятся сведения об авторах.

Для рассмотрения вопроса опубликования необходимо отправить в адрес редакции по электронной почте текст доклада (на русском языке) и заявку на участие в конференции.

Подробнее об издании на сайте: <http://srcms.ru/npmity.html>

СОДЕРЖАНИЕ

Аэронавигация, авиационная и ракетно-космическая техника

Решетов Д.В., Попов А.Н., Полищук М.Н. Анализ применения полиуретовых формирователей импульсов ударного ускорения при испытаниях изделий авиационной и ракетно-космической техники	4
---	---

Машиностроение

Сизо А.А., Литвинов А.Е. Расчет напряжений изгиба ленточной пилы.....	7
Елисеев А.В., Миронов А.С. Разработка методов управления динамическими режимами вибрационных технологических машин	10
Тищенко И.В., Харченко А.О. Исследования в области технологии изготовления бесстружечных метчиков – возможный ключ к внедрению прогрессивных конструкций метчиков	13
Королев Р.Д. Разработка подхода по калибровке гексапода с помощью системы технического зрения.....	15

Сельское, лесное и рыбное хозяйство

Голембовский В.В., Пашкова Л.А., Халимбеков Р.З. Технический прогресс в эффективном развитии отрасли овцеводства	19
---	----

Техника и технологии наземного транспорта

Марцинковский С.А., Татаринцев В.Ю., Артёмов А.В., Школьных А.В., Прядкин В.И. Исследование влияния параметров шин на тяговые качества автомобиля повышенной проходимости.....	22
---	----

Управление в технических системах

Гордеева Д.С., Веревкин А.П. Система поддержки принятия решений для оперативного управления процессом гидроочистки.....	26
--	----

Химия и химические технологии

Петров М.Н., Ратасеп М.А. Налипание вязких нефтепродуктов на коалесцирующую насадку.....	29
---	----

АНАЛИЗ ПРИМЕНЕНИЯ ПОЛИУРЕТОВЫХ ФОРМИРОВАТЕЛЕЙ ИМПУЛЬСОВ УДАРНОГО УСКОРЕНИЯ ПРИ ИСПЫТАНИЯХ ИЗДЕЛИЙ АВИАЦИОННОЙ И РАКЕТНО-КОСМИЧЕСКОЙ ТЕХНИКИ

Решетов Д.В., Попов А.Н., Полищук М.Н.

Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, Санкт-Петербург

Ключевые слова: ударные испытания, импульс ударного ускорения, полиуретановый формирователь импульса, динамическая жесткость, конфигурация формирователей, динамическая усталость.

Аннотация. В работе рассматривается практика испытаний изделий авиационной и ракетно-космической техники на воздействие механического удара при использовании в качестве формирователей импульсов ударных ускорений полиуретановых формирователей (программаторов). Представлены результаты экспериментального исследования полиуретановых формирователей различной твердости и геометрии. Показано влияние способа установки на параметры импульса ускорения. Проанализированы основные преимущества и недостатки использования формирователей из полиуретана.

ANALYSIS OF THE APPLICATION OF POLYURETHANE SHOCK PULSE PROGRAMMERS IN AVIATION AND ROCKET-SPACE EQUIPMENT TESTING

Reshetov D.V., Popov A.N., Polishchuck M.N.

Peter the Great Saint-Petersburg Polytechnic University, Saint-Petersburg

Keywords: shock testing, shock acceleration pulse, polyurethane pulse programmer, dynamic stiffness, configuration of programmers, dynamic fatigue.

Abstract. This paper presents an overview of mechanical shock testing practices for aviation and aerospace equipment using polyurethane pads as shock acceleration pulse programmers. Experimental results for polyurethane programmers of varying hardness and geometry are provided, with particular attention given to the influence of installation methods on acceleration pulse characteristics. The main advantages and disadvantages of using polyurethane programmers are analyzed.

Испытания изделий авиационной и ракетно-космической техники на воздействие одиночных и многократных механических ударов проводятся на специализированном оборудовании – ударных испытательных машинах (стендах). Одной из основных проблем при проведении механических испытаний является воспроизведение импульса ударного ускорения с заданным сочетанием пикового ударного ускорения, длительности и формы. При подготовке требований к испытаниям разработчик изделия анализирует динамические нагрузки, действующие в течение жизненного цикла объекта, и на их основе назначает режимы для будущей проверки. Эти требования формулируются с учетом стандартов, регламентирующих основные степени жесткости ударных испытаний для конкретных типов изделий [1, 2].

Получение требуемых импульсов ударного ускорения зависит от технологических возможностей испытательного оборудования. При этом, важное значение имеет также выбор формирователей импульсов.

Опыт эксплуатации ударных стендов показал, что конкретные параметры импульсов ударного ускорения, полученные на одной ударной машине, не гарантируют аналогичный результат на другой из-за возможных отличий в их энергетических и жесткостных характеристиках.

Отсутствие достоверных аналитических моделей, описывающих поведение формирователей в процессе удара, приводит к тому, что единственным адекватным способом их выбора при испытаниях становится опыт и интуиция испытателя.

Для создания импульсов полусинусоидальной формы небольшой длительности обычно применяют квазиупругие формирователи из высокопрочных полимеров, таких как полиуретан [3].

На рисунке 1 показаны импульсы ударного ускорения с различными параметрами, полученные авторами на ударной машине СМУ1200 с массой стола с изделием 570 кг. Испытания проводились на полиуретановых формирователях различной жесткости высотой 40 мм и диаметром 150 мм.

Анализ результатов ударных испытаний показал высокую степень зависимости параметров ударных импульсов от твердости используемых формирователей. Например, при одинаковой кинетической энергии ударного стола замена полиуретанового формирователя с твердостью 60 ед. Шора А на формирователь с твердостью 90 ед. Шора А приводит к двукратному увеличению пикового ударного ускорения и соответствующему уменьшению длительности импульса (рис. 1).

Кроме выбора твердости материала, для достижения заданных параметров импульса ударного ускорения применяются разные способы их установки: параллельное, последовательное и параллельно-последовательное. Первый заключается в параллельном использовании нескольких формирователей,

установленных на наковальне в один слой (рисунок 2, б). При этом важно обеспечить одинаковую высоту формирователей для исключения дробного удара.

Второй способ предусматривает последовательную или последовательно-параллельную установку формирователей в стопку. Полученные при различных комбинациях формирователей ударные импульсы представлены на рисунке 2, а, в. Для соединения полиуретановых формирователей между собой к их торцам были прикреплены фланцы. Модульная конструкция, реализованная таким образом, позволяет легко изменять конфигурацию комплекта, подстраивая его под конкретные требования по параметрам импульса ударного ускорения.

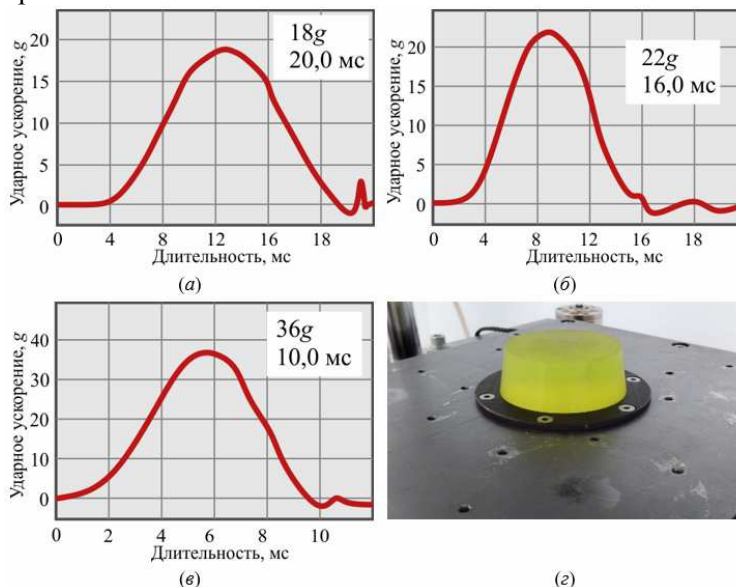


Рис. 1. Ударные импульсы на полиуретановых формирователях разной твердости: (а) – 60 ед. Шора А, (б) – 80 ед. Шора А, (в) – 90 ед. Шора А, (г) – внешний вид формирователя

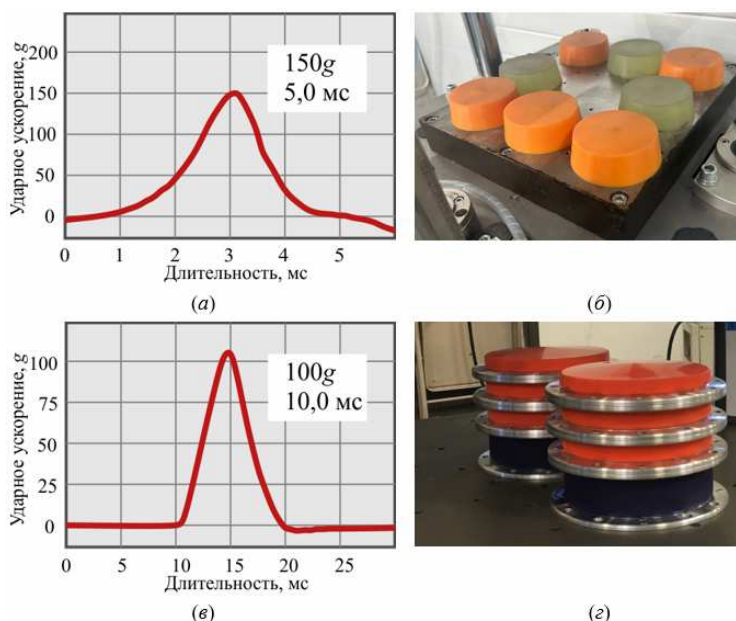


Рис. 2. Ударные импульсы на различных комплектах полиуретановых формирователей: (а) – импульс при параллельной установке, (б) – параллельная установка формирователей разной твердости, (в) – импульс при последовательно-параллельной установке, (г) – последовательно-параллельная установка формирователей разной твердости

Большие пиковые ударные ускорения на полиуретановых формирователях получить трудно даже при существенном увеличении скорости соударения. Для реализации таких значений, авторами использовались более твердые полимеры, такие как зедекс и полиацеталь.

Следует также отметить, что при незначительном количестве испытаний, но при высоких энергиях удара или при большой серии испытаний на невысоких энергиях, полиуретановые формирователи подвержены разрушению вследствие динамической усталости [4].

На рисунке 3 показаны поврежденные формователи импульсов после воспроизведения большого количества многократных ударов [5].

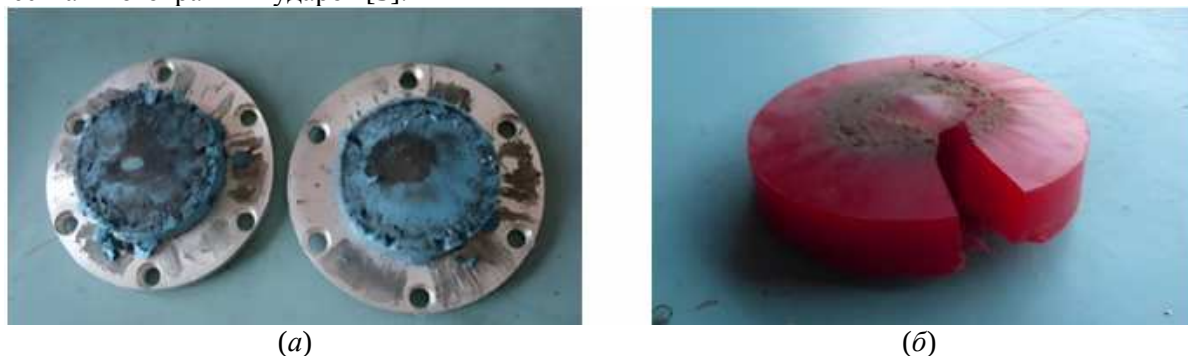


Рис. 3. Разрушенные полиуретановые формователи: (а) – высокой твердости, (б) – низкой твердости

Еще одной особенностью механических свойств некоторых полимеров является упругий гистерезис. Наблюдаемая остаточная деформация после релаксации формователя, известная как кажущаяся остаточная деформация, постепенно уменьшается [6]. Однако при высокой частоте многократных ударов этот эффект может негативно повлиять на воспроизводимость импульсов ударного ускорения.

Выводы

1. Твердость и способ установки полиуретановых формователей существенно влияют на пиковое ускорение и длительность ударного импульса.
2. Полиуретан эффективен при получении коротких импульсов полусинусоидальной формы, однако его механические свойства могут ухудшать воспроизводимость импульсов при многократных ударах.
3. При высоких энергиях удара и больших сериях испытаний полиуретановые формователи подвержены разрушению из-за динамической усталости, что ограничивает их применение.

Список литературы

1. ГОСТ 28215-89. Основные методы ударных испытаний на воздействие внешних факторов. Часть 2. Испытание Eb и руководство: многократные удары. – М.: Стандартиформ, 1989. – 15 с.
2. ГОСТ 28213-89. Основные методы ударных испытаний на воздействие внешних факторов. Часть 2. Испытание EA и руководство: одиночный удар. – М.: Стандартиформ, 1989. – 23 с.
3. Polishchuck M.N., Popov A.N., Reshetov D.V. Mathematical model of shock machine // Advances in Mechanical Engineering. Lecture Notes in Mechanical Engineering. Springer, Cham. 2022, pp. 86-96.
4. Нелсон У.Е. Технология пластмасс на основе полиамидов. – М.: Химия, 1979. – 256 с.
5. Jiao S., Wang Y., Zhang L., Hua H. Shock wave characteristics of a hydraulic damper for shock test machine // Mechanical Systems and Signal Processing. 2010, vol. 24, pp. 1570-1578.
6. Воюцкий С.С. Курс коллоидной химии. – М.: Химия, 1976. – 512 с.

Сведения об авторах:

Решетов Дмитрий Валентинович – аспирант;

Попов Аркадий Николаевич – к.т.н., доцент;

Полищук Михаил Нусимович – к.т.н., доцент.

РАСЧЕТ НАПРЯЖЕНИЙ ИЗГИБА ЛЕНТОЧНОЙ ПИЛЫ

Сизо А.А., Литвинов А.Е.

Кубанский государственный технологический университет, Краснодар

Ключевые слова: напряжения, изгиб, ленточная пила, удлинение, пильное полотно, шкив, напряженное состояние, статическое состояние, удлинение.

Аннотация. В данной статье рассматриваются основные возникающие в полотне пилы напряжения, влияния этих напряжений на работу станка. Получены принципиальные схемы состояний ленточной пилы в процессе работы. Рассчитаны значения нормальных напряжений при установке и натяжении ленточной пилы, при пуске, при установившемся движении станка, при работе станка в момент распиловки. Проведена оценка ряда факторов, определяющих влияние тангенциальных и нормальных напряжений на ленточную пилу.

CALCULATION OF BENDING STRESSES OF A BAND SAW

Sizo A.A., Litvinov A.E.

Kuban State Technological University, Krasnodar

Keywords: stress, bending, band saw, elongation, saw blade, pulley, stress state, static state, elongation.

Abstract. This article discusses the main stresses that occur in the saw blade, the effects of these stresses on the operation of the machine. Schematic diagrams of the states of the band saw during operation are obtained. The values of normal stresses during installation and tension of the band saw, during start-up, during steady movement of the machine, and during machine operation at the time of sawing are calculated. A number of factors determining the effect of tangential and normal stresses on a band saw have been evaluated.

Напряжения изгиба ленты на шкивах в общем балансе напряжений, которым подвергается лента в процессе эксплуатации (предварительное натяжение, тепловое расширение, силы резания, центробежные силы, внутренние напряжения при изготовлении пилы и т.д.), имеют наибольшие значения по величине и являются линейными функциями толщины ленты s (мм) и диаметра пильного шкива D (мм). Поэтому при установке конкретного размера пилы на конкретную модель необходимо рассчитать значения этих напряжений и сравнить их с допустимыми значениями напряжений, исходя из условий прочности.

На рисунке 1 изображена схема изгиба ленты на ободе пильного шкива.

Растягивающие напряжения возникают на внешней стороне ремня в результате изгиба, а сжимающие напряжения на внутренней стороне ремня. Абсолютное удлинение λ , испытываемое наружной частью ремня при окружении половины зубчатого шкива, определяется как разница между полукругом на наружной поверхности ремня и нейтральным слоем в середине [1]:

$$\lambda = \pi \cdot (R + S) - \pi \cdot (R + \frac{s}{2}) = \frac{\pi \cdot s}{2}. \quad (1)$$

Относительное удлинение будет следующее:

$$\Delta = \frac{\lambda}{\pi \cdot (R + \frac{s}{2})} = \frac{\pi \cdot s}{2 \cdot \pi (R + \frac{s}{2})} \approx \frac{s}{2 \cdot R} = \frac{s}{D}, \quad (2)$$

где D – диаметр шкивов.

Тогда величина напряжения от изгиба ленты на шкивах получится:

$$\sigma = E \cdot \Delta = E \cdot \frac{s}{D}, \quad (3)$$

где E – модуль упругости;

Если известны толщина пильного полотна, материал ленточной пилы и диаметр шкива станка, то можно определить изгибающие напряжения в пильном полотне при его установке на станок.

Однако этот расчет является неполным из-за сложного характера изгибающих напряжений.

Значительно сложнее оценить напряженное состояние полотна ленточной пилы. Это связано с тем, что размеры секций ленточной пилы (толщина и ширина) различаются в десятки раз, а в процессе работы ленточные пилы испытывают различные виды нагрузок в разных секциях. Напряжение, действующее на ленточную пилу во время работы, рассматривается как сумма несвязанных напряжений, действующих по всей длине пилы [2]:

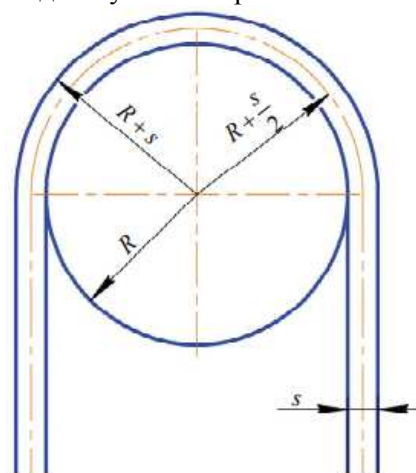


Рис. 1. Схема изгиба ленты на ободе пильного шкива: R – радиус шкива; s – толщина пилы

$$\sum \sigma = \sigma_n + \sigma_{изг} + \sigma_{цс} + \sigma_{вал} + \sigma_{наг} + \sigma_{нак} + \sigma_{рез} + \sigma_{проч}, \quad (4)$$

где σ_n , $\sigma_{изг}$, $\sigma_{цс}$, $\sigma_{вал}$, $\sigma_{наг}$, $\sigma_{нак}$, $\sigma_{рез}$, $\sigma_{проч}$ – напряжения от сил предварительного натяжения пилы T_0 , изгиба на шкивах, от центробежных сил, степени вальцевания, нагрева, наклона шкивов, сил резания и прочие.

В таблице 1 приведены виды напряжений в ленточных пилах.

Табл. 1. Виды напряжений ленточных пил

Вид нормальных напряжений	Расчетная формула	Обозначение	Численные значения, МПа, (%)
От силы предварительного натяжения, σ_n	$\sum \sigma = \sigma_n + \sigma_{изг} + \sigma_{цс} + \sigma_{вал} + \sigma_{наг} + \sigma_{нак} + \sigma_{рез} + \sigma_{проч},$ $\sigma_n = \frac{T_0}{b \cdot s}$	T_0 – усилие предварительного натяжения; b , s – ширина и толщина пилы	50...80 (15%)
От изгиба ленточной пилы на шкивах, $\sigma_{изг}$	$\sigma_{изг} = E \cdot \frac{s}{D}$	E – модуль упругости; D – диаметр шкивов	150...220 (40...45%)
От центробежных сил, $\sigma_{цс}$	$\sigma_{цс} = 0,01 \cdot v^2 \cdot \frac{y}{q}$	V – скорость резания; y – плотность материала; q – скорость свободного падения	5...10 (1,5...2%)
От степени вальцевания, $\sigma_{вал}$	$\sigma_{вал} = \frac{\Delta L}{L} \cdot E$	ΔL – удлинение задней кромки пилы; L – длина пилы	50...70 (12...15%)
От нагрева, $\sigma_{наг}$	$\sigma_{наг} = E \cdot \alpha_t (t_n - t_c)$	α_t – коэффициент линейного расширения пилы; t_n – температура пилы; t_c – температура окружающей среды	20...50 (6...9%)
От наклона шкивов, $\sigma_{нак}$	$\sigma_{нак} = E \cdot \varepsilon$	ε – относительное удлинение пилы от наклона шкивов	5...10 (1,5...2%)
От сил резания, $\sigma_{рез}$	$\sigma_{рез} = \frac{P_k \cdot z}{b \cdot s}$	P_k – касательная составляющая сил резания; z – число зубьев пилы, находящихся в пропиле	50...120 (15...20%)
Прочие, $\sigma_{проч}$			Остальное
Суммарные			330...560

Для всесторонней оценки напряженного состояния ленточной пилы рассмотрим четыре случая возникновения напряжения на ленточной пиле. А именно: статическое состояние, когда пила установлена и натянута, момент запуска пилы, устойчивая работа станка на холостом ходу и когда пила выполняет операцию резки древесины (рис. 2).

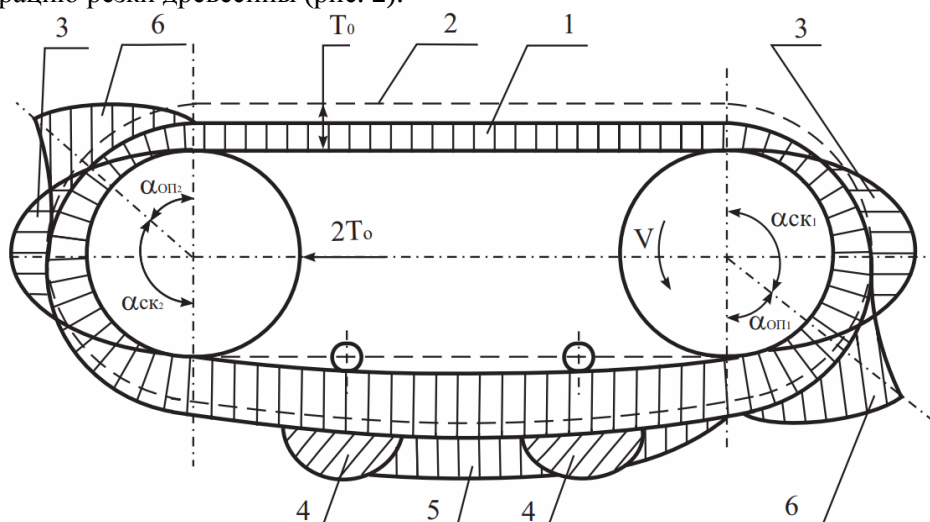


Рис. 2. Схема напряженного состояния ленточной пилы в процессе работы: $\alpha_{ск1}$, $\alpha_{ск2}$ – угол скольжения пилы; $\alpha_{он1}$, $\alpha_{он2}$ – угол отжима пилы; напряжения: 1) в холостой ветви ленточной пилы; 2) в рабочей и холостой ветвях пилы в статике; 3) от изгиба ленточной пилы на шкивах; 4) от оттяжки пилы направляющими роликами; 5) от сил резания; 6) возникающие при передаче тягового усилия

Тогда нормальные напряжения будут принимать следующие значения [3]:

– в статике, при установке и натяжении ленточной пилы:

$$\sum \sigma_{ст} = \sigma_{уст}; \quad (5)$$

– в момент пуска ленточнопильного станка:

$$\sum \sigma_{пуск} = \sigma_{уст} + \sigma_{пуск}; \quad (6)$$

– при установившемся движении станка на холостом ходу:

$$\sum \sigma_{хх} = \sigma_{уст} + \sigma_{цс} + \sigma_{тяг}; \quad (7)$$

– при работе станка в момент распиловки древесины:

$$\sum \sigma_{раб} = \sigma_{уст} + \sigma_{цс} + \sigma_{тяг} + \sigma_{наг} + \sigma_{рез}; \quad (8)$$

где $\sigma_{уст}$ – напряжения при установке и натяжении пилы; $\sigma_{пуск}$ – натяжение при пуске станка; $\sigma_{цс}$ – напряжение от центробежных сил; $\sigma_{тяг}$ – тяговое усилие; $\sigma_{наг}$ – напряжение от нагрева; $\sigma_{рез}$ – напряжение от сил резания.

Уравнения (2-5) и диаграмма напряжений на рисунке 2 показывают, что не все компоненты полного напряжения участвуют в формировании максимального нормального напряжения. Неопределенными являются следующие напряжения: напряжение σ_{nr} , обусловленное отжатием пилы направляющими роликами, напряжение σ_{start} , возникающее в ленточной пиле в момент пуска, и напряжение $\sigma_{traction}$ в ленточной пиле, возникающее при передаче тягового усилия.

Определение напряжений, возникающих в ленточной пиле в момент пуска и при передаче тягового усилия, представляет большую трудность. Для определения пусковых напряжений можно использовать только гипотезу о том, что напряжения возникают на границе между дугами относительного скольжения и неподвижности и что их уровень связан с пусковой (пиковой) мощностью приводного двигателя. Уровень этих напряжений можно определить по уровню и характеру напряжений, возникающих при передаче тягового усилия ленточной пилой [4].

Существует ряд факторов, определяющих влияние тангенциальных и нормальных напряжений на ленточную пилу, но последние не могут быть просто суммированы при оценке напряженного состояния ленточной пилы. Необходимо рассматривать каждую секцию в отдельности, иначе уровень рабочего напряжения будет завышен.

На наиболее напряженную секцию ленточной пилы влияют не все действующие напряжения, а только те, которые возникают при запуске станка для передачи тягового усилия, и общие напряжения во время работы.

Финансирование. Работа поддержана Советом по грантам Президента Российской Федерации (Свидетельство № МК-6201.2018.8).

Список литературы

1. Литвинов А.Е., Сизо А.А. Оптимизация параметров и режимов резания ленточнопильных станков // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. – 2024. – № 12. – С. 357-359.
2. Сизо А.А., Литвинов А.Е. Моделирование процесса нагружения ленточных пил отрезных металлорежущих станков // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. – 2024. – № 12. – С. 348-351.
3. Литвинов А.Е., Сизо А.А. Определение режимов резания ленточнопильных отрезных станков // В книге: Материалы, оборудование и ресурсосберегающие технологии. Материалы Международной научно-технической конференции. – Могилев: Белорусско-Российский университет, 2024. – С. 54-55.
4. Литвинов А.Е., Сизо А.А. Обзор современного состояния и технологий улучшения эксплуатационных характеристик ленточных пил // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. – 2024. – № 12. – С. 360-366.

Сведения об авторах:

Сизо Алан Анзорович – аспирант;

Литвинов Артем Евгеньевич – д.т.н., профессор, заведующий кафедрой технической механики и специальных машин имени профессора А.А. Петрика.

РАЗРАБОТКА МЕТОДОВ УПРАВЛЕНИЯ ДИНАМИЧЕСКИМИ РЕЖИМАМИ ВИБРАЦИОННЫХ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ МАШИН

Елисеев А.В., Миронов А.С.

Иркутский государственный университет путей сообщения, Иркутск

Ключевые слова: вибрационные машины, резонансные режимы, параметрическая адаптация, динамическая стабильность, амплитудно-частотные характеристики, энергоэффективность.

Аннотация. Рассматриваются вопросы разработки методов управления динамическими состояниями вибрационных технологических машин, обеспечивающих постоянство амплитуд колебаний рабочих органов. На примере системы с одной степенью свободы исследована взаимосвязь ширины резонансного пика, демпфирования, массы и жесткости. Предложена методология синтеза параметров, основанная на одновременной коррекции двух переменных. Результаты демонстрируют особенности повышение устойчивости процессов при условии сохранения энергоэффективности.

DEVELOPMENT OF METHODS FOR CONTROLLING DYNAMIC MODES OF VIBRATION TECHNOLOGICAL MACHINES

Eliseev A.V., Mironov A.S.

Irkutsk State Transport University, Irkutsk

Keywords: vibration machines, resonant modes, parametric adaptation, dynamic stability, amplitude-frequency characteristics, energy efficiency.

Abstract. The article is devoted to the development of methods for controlling the dynamic states of vibration technological machines, ensuring constant amplitudes of vibrations of working bodies. Using the example of a system with one degree of freedom, the relationship between the resonance peak width, damping, mass and stiffness is studied. A methodology for synthesizing parameters based on simultaneous correction of two variables is proposed. The results demonstrate increased process stability while maintaining energy efficiency.

Современные вибрационные машины требуют обеспечения стабильности амплитуд колебаний в условиях частотных отклонений [1]. Традиционные методы энергоэффективности, основанные на узких резонансных пиках, повышают чувствительность к расстройкам между собственными частотами и частотами внешних возмущений [2].

В работе предложено расширение резонансной зоны за счёт параметрической адаптации. В качестве расчетной схемы вибрационной технологической машины (в частности, машины по вибрационному уплотнению бетонных растворов) рассматривается механическая колебательная система, образованная сосредоточенной массой m_1 , которая отображает массу рабочего органа, упругим элементом с жесткостью k_1 , а так же демпфером с коэффициентами вязкого трения b_1 (рис. 1, а). Предполагается, что вибрационный вибровозбудитель, обеспечивающий колебания рабочего органа, создает силовое возмущение Q_1 , приложенное к массе m_1 ; система совершает малые вынужденные колебания относительно положения статического равновесия.

Энергоэффективность работы вибрационного стенда обеспечивается в режиме колебаний рабочего органа на частоте резонанса. Для оптимизации резонансного режима параметры системы корректируются таким образом, чтобы увеличить ширину резонансного пика. Вместе с тем, увеличение ширины резонансного пика приводит к снижению резонансных амплитуд колебаний, что снижает эффективность вибрационного процесса в целом. Задача заключается в разработке метода обеспечения постоянной амплитуды колебаний на резонансной частоте [3].

Для оценки динамических состояний используется методология структурного математического моделирования [4], в рамках которой механической колебательной системе ставится в соответствие схема эквивалентной в динамическом отношении системы автоматического управления (рис. 1, б). На основе структурной схемы (рис. 1, б) построена передаточная функция для оценки динамических взаимодействий элементов вибрационной технологической машины:

$$W(p) = \frac{\bar{x}_1}{Q_1} = \frac{1}{m_1 p^2 + b_1 p + k_1}. \quad (1)$$

Амплитудно-частотная характеристика передаточной функции (1) позволяет охарактеризовать динамическую податливость:

$$A(\omega) = \left| \frac{\bar{x}_1}{Q_1} \right| = \frac{1}{\sqrt{(k_1 - m_1 \omega^2)^2 + (b_1 \omega)^2}}. \quad (2)$$

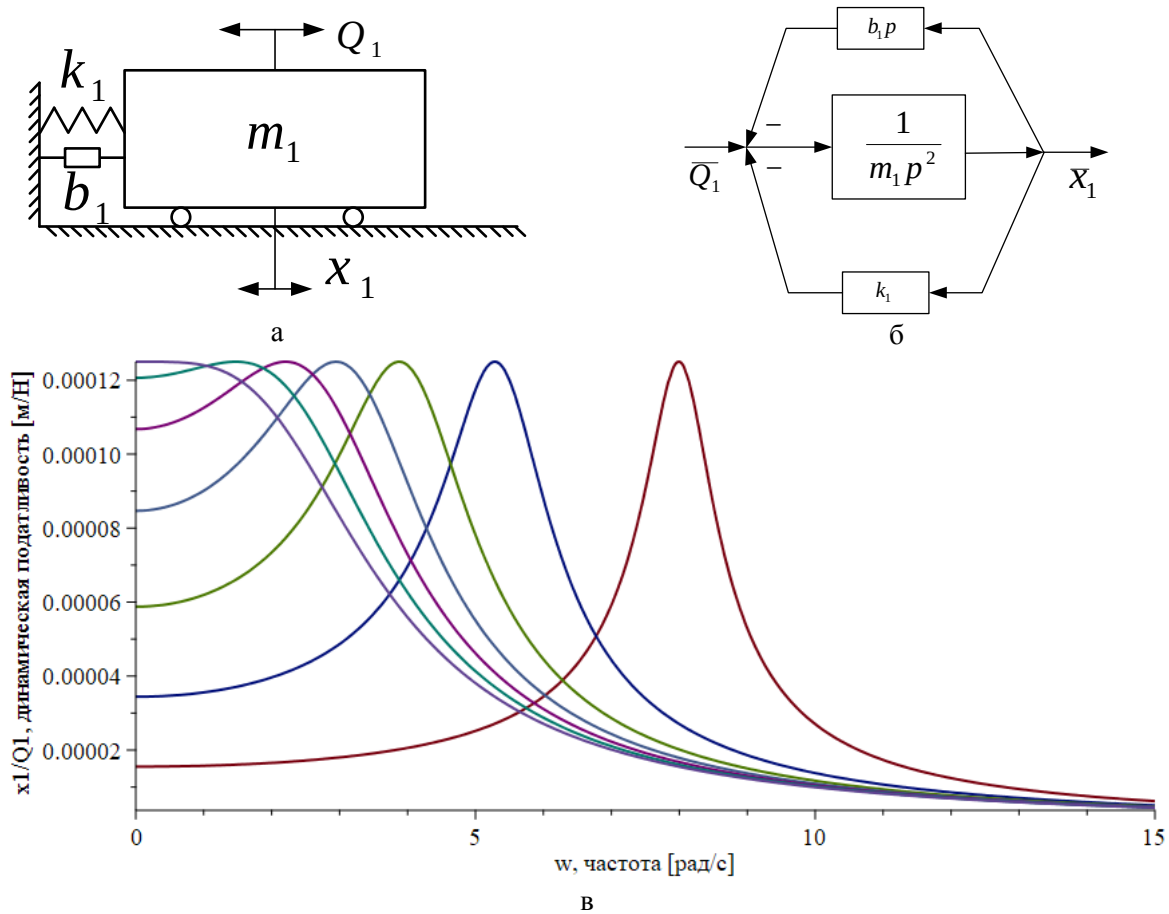


Рис.1. Механическая колебательная система: а – расчетная схема вибрационной технологической машины; б – структурная схема, где $p = j\omega$, $j = \sqrt{-1}$ – мнимая единица, знак «-» над символом означает изображение Лапласа; в – семейство амплитудно-частотных характеристик с фиксированным максимальным значением C на частоте резонанса

Традиционно для оценки ширины резонансного пика используется понятие добротности. Вместе с тем, расчет добротности предполагает определение частот на уровне 0,7 от максимума резонансного пика, что не всегда может быть реализовано в полной мере. В качестве альтернативы, обеспечивающей более высокую гладкость, может быть использована характеристика радиуса кривизны, рассчитанная в вершине резонансного пика. Резонансная частота составляет:

$$\omega_{res} = \sqrt{\frac{k_1}{m_1} - \frac{b_1^2}{2m_1^2}}, \quad (3)$$

при условии малых сил трения

$$b_1 < \sqrt{2m_1k_1}. \quad (4)$$

Значение амплитудно-частотной характеристики в резонансной частоте составляет:

$$A_{res} = A(\omega_{res}) = \frac{1}{b_1 \sqrt{\frac{k_1}{m_1} - \left(\frac{b_1}{2m_1}\right)^2}}. \quad (5)$$

Радиус кривизны, рассчитанный для кривой графика амплитудно-частотной характеристики в точке резонанса, составляет:

$$R(\omega_{res}) = \frac{1}{4m_1^2 A_{res}^3 \omega_{res}^2}. \quad (6)$$

Условие постоянства резонансной амплитуды может представляться выражением:

$$b_1^2 \left(\frac{k_1}{m_1} - \left(\frac{b_1}{2m_1} \right)^2 \right) = \frac{1}{C^2}, \quad (7)$$

где C – это константа, значение которой отображает максимальное значение амплитудно-частотной характеристики для некоторой совокупности параметров. В частности, данные условия (7) определяют по массе m_1 и коэффициенту вязкого трения b_1 жесткость

$$k_1 = \frac{m_1}{b_1^2 C^2} + \frac{b_1^2}{4m_1}, \text{ при условии } k_1 > \frac{b_1^2}{2m_1}. \quad (8)$$

На рисунке 1, в представлено семейство амплитудно-частотных характеристик передаточных функций систем (1), для которых изменяется жесткость (8) в зависимости от коэффициента вязкости, рассматриваемого в качестве независимого параметра. Значения собственных частот по мере возрастания коэффициента связности приближаются к нулю. Радиус кривизны по мере возрастания коэффициента вязкого трения неограниченно возрастает, что свидетельствует о возможности расширения резонансного пика при сохранении амплитуды резонанса.

Разработанный метод позволяют совместить энергоэффективность с устойчивостью к частотным отклонениям. Результаты применимы при проектировании вибрационных машин для уплотнения бетонных смесей.

Список литературы

1. Блехман И.И. Теория вибрационных процессов и устройств. Вибрационная механика и вибрационная техника. – СПб.: ИД Руда и Металлы, 2013. – 640 с.
2. Асташев В.К. О новых направлениях использования явления резонанса в машинах // Вестник научно-технического развития. – 2011. – № 8(48). – С. 10-15.
3. Федоренко И.Я., Гнездилов А.А. Динамические свойства двухмассной вибрационной технологической машины // Вестник Алтайского государственного аграрного университета. – 2016. – № 3(137). – С. 179-183.
4. Eliseev A.V. Structural Mathematical Modeling Applications in Technological Machines and Transportation Vehicles. – Hershey, PA: IGI Global, 2023. – 228 p.

Сведения об авторах:

Елисеев Андрей Владимирович – к.т.н., доцент кафедры математики;

Миронов Артем Сергеевич – соискатель НОЦ современных технологий.

ИССЛЕДОВАНИЯ В ОБЛАСТИ ТЕХНОЛОГИИ ИЗГОТОВЛЕНИЯ БЕССТРУЖЕЧНЫХ МЕТЧИКОВ – ВОЗМОЖНЫЙ КЛЮЧ К ВНЕДРЕНИЮ ПРОГРЕССИВНЫХ КОНСТРУКЦИЙ МЕТЧИКОВ

Тищенко И.В., Харченко А.О.

Севастопольский государственный университет, Севастополь

Ключевые слова: бесстружечный метчик, технология изготовления бесстружечных метчиков, раскатчик, внутреннее резьбовыдавливание, обработка мелких внутренних резьб, деформирующий метчик.

Аннотация. Режущие метчики недостаточно эффективны для обработки резьб М1...М3 в корпусах приборов, особенно из высокопластичных материалов. Бесстружечные метчики обеспечивают более высокое качество резьбы, но недостаточно распространены из-за несовершенства технологии их изготовления. Описанные в ряде работ технические решения позволяют улучшить качество бесстружечных метчиков. Научное осмысление технологии изготовления бесстружечных метчиков может позволить внедрить прогрессивные конструкции метчиков в практику.

RESEARCH ON FLUTELESS TAPS MANUFACTURING TECHNOLOGY – KEY FOR PUTTING PROGRESSIVE TAP DESIGNS INTO SERVICE

Tishchenko I.V., Kharchenko A.O.

Sevastopol State University, Sevastopol

Keywords: fluteless tap, fluteless taps manufacturing technology, rolling tap, extrusion tapping, small-size internal threads machining, forming tap.

Abstract. Cutting taps are not effective enough for manufacturing of M1...M3 threads in device housings, especially made of high-plastic alloys. Fluteless taps provide higher thread quality, but these taps are not widespread due to manufacturing technology imperfection. Several papers suggest solutions for fluteless taps quality improvement. Scientific comprehension of fluteless taps manufacturing technology would allow one to put progressive tap designs into service.

Прогресс в области микроэлектроники ведёт к уменьшению размеров компонентов, используемых в приборостроении [1]. Поскольку самым распространённым способом крепления электронных компонентов в корпусах приборов являются резьбовые соединения, то с уменьшением размеров компонентов уменьшаются и размеры крепёжных изделий. На сегодняшний день компоненты приборов всё чаще крепятся к корпусу с помощью винтов М1...М3. Получение винтов такого размера является более простой задачей, чем обработка резьбовых отверстий под них в корпусах приборов. Из-за малых размеров обработка резьб резцами, резьбовыми фрезами, резьбонарезными и резьбонакатными головками невозможна. Поэтому единственным относительно простым и экономичным способом является обработка метчиками.

Больше всего распространена обработка режущими метчиками. Однако, данная технология имеет ряд недостатков. Во-первых – частая поломка метчика из-за скапливания стружки по причине её плохого отведения, особенно в глухих отверстиях. Во-вторых – низкое качество резьбы в материалах с высокой пластичностью. Корпусы приборов часто изготавливают из алюминия, нержавеющей стали и жаропрочных сплавов. И при обработке режущими метчиками происходит налипание материала на режущие кромки.

Устранить данные недостатки можно, если использовать бесстружечные метчики, которые формируют резьбовую поверхность путём пластической деформации материала заготовки.

Бесстружечные метчики обладают большей надёжностью и долговечностью, т.к. в процессе работы не образуется стружка, а значит не происходит её скапливания и заклинивания инструмента. Обработка данным способом высокопластичных материалов обеспечивает высокое качество резьбовой поверхности и механических свойств резьбы, за счёт дополнительного упрочнения и улучшения микроструктуры [1]. Недостатками являются более высокие значения крутящего момента при обработке и более высокие требования к параметрам отверстия под резьбу.

Однако бесстружечные метчики недостаточно распространены. Основной причиной этому является несовершенство технологии изготовления. Более того, вопросы технологии многие годы оставались вне поля зрения исследователей. Основной упор делался на изучение физики процесса формообразования резьбы при обработке бесстружечными метчиками, оптимизации геометрии инструмента и режимов обработки [1]. Это привело к тому, что конструкции бесстружечных метчиков, полученные на основе результатов фундаментальных исследований, не могут быть в полной мере реализованы. Научные исследования в области технологии могли бы навести мосты между фундаментальной наукой и реальным производством.

Для этого в Севастопольском государственном университете предложен ряд решений, которые направлены на повышение качества производимых бесстружечных метчиков.

В работе [2] предложено с помощью резьбонакатных головок с пружинящим корпусом получать на четырёхгранных заготовках резьбовый профиль с одновременным затылованием. Упрочнение от накатывания и последующая термообработка обеспечивают высокую точность и твёрдость рабочей части бесстружечного метчика, а также прочность и стойкость метчика в целом. При этом трудоёмкость изготовления снижается.

В работе [3] предложены несколько вариантов резьбонакатных головок. Резьбонакатная головка с эксцентриковыми роликами обеспечивает получение полного резьбового профиля со смазочными канавками. Резьбонакатная головка с пружинящим корпусом позволяет получать рабочую часть бесстружечного метчика с необходимой формой заборного участка. Резьбонакатная головка с силовым замыканием с помощью упругого элемента обеспечивает получение резьбового профиля по всему периметру поперечного сечения метчика.

В работе [4] описано получение резьбового профиля с затылованием путём накатывания резьбы на круглой заготовке с лысками и последующим деформированием матрицей и пуансоном для получения окончательной формы поперечного сечения.

Таким образом, научное осмысление технологии изготовления бесстружечных метчиков может стать ключом к внедрению новых прогрессивных конструкций метчиков в существующую практику металлообработки.

Список литературы

1. Shen T., Yang Z., Zhang L. Research on Extrusion Forming Process of Micro Internal Thread for Nickel-plated Aluminum Alloy Parts // Journal of Physics: Conference Series. 2024, vol. 2785, p. 012009. doi.org/10.1088/1742-6596/2785/1/012009.
2. Харченко А.О., Харченко А.А., Владецкая Е.А. Повышение эффективности формирования резьбы при изготовлении мелкоразмерных пластически деформирующих метчиков // Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии. – 2022. – №5 (355). – С. 120-129.
3. Харченко А.О., Харченко А.А., Владецкая Е.А. Прогрессивное оборудования для получения рабочей части мелкоразмерных пластически деформирующих метчиков // Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии. – 2022. – №5 (355). – С. 158-164.
4. Харченко А.О., Владецкая Е.А., Лазуткин В.О. Прогрессивные способы изготовления рабочей части пластически деформирующих метчиков // Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии. – 2023. – №1 (357). – С. 100-108.

Сведения об авторах:

Тищенко Иван Владимирович – аспирант;

Харченко Александр Олегович – к.т.н., профессор, профессор кафедры «Автоматизация и технология машиностроения».

РАЗРАБОТКА ПОДХОДА ПО КАЛИБРОВКЕ ГЕКСАПОДА С ПОМОЩЬЮ СИСТЕМЫ ТЕХНИЧЕСКОГО ЗРЕНИЯ

Королев Р.Д.

*Балтийский государственный технический университет «ВОЕНМЕХ» им. Д.Ф. Устинова,
Санкт-Петербург*

Ключевые слова: гексапод, калибровка, манипулятор, система технического зрения, линейный привод, платформа Гью-Стюарта.

Аннотация. Статья посвящена методу калибровки гексапода – манипулятора с параллельной структурой – с применением системы технического зрения. В данной работе предложен метод, основанный на обработке данных с камеры высокого разрешения и детектирования луча от лазерного указателя, закрепленного на гексапode в качестве исполнительного инструмента. Особое внимание уделено оптимизации занимаемой поправками памяти в системе управления.

DEVELOPMENT OF A HEXAPOD CALIBRATION APPROACH USING A VISION SYSTEM

Korolev R.D.

Baltic State Technical University "VOENMEH" named after D.F. Ustinov, Saint-Petersburg

Keywords: hexapod, calibration, manipulator, vision system, linear actuator, Hugh-Stewart platform.

Abstract. The article is devoted to the calibration method of a hexapod manipulator with a parallel structure using a vision system. In this paper, we propose a method based on processing data from a high-resolution camera and detecting a beam from a laser pointer mounted on a hexapod as an actuating tool. Special attention is paid to optimizing the occupied area. The article is devoted to the calibration method of a hexapod manipulator with a parallel structure using a vision system. In this paper, we propose a method based on processing data from a high-resolution camera and detecting a beam from a laser pointer mounted on a hexapod as an actuating tool. Special attention is paid to optimizing the memory used by amendments in the control system.

В настоящее время во многих областях техники успешно применяются роботы на основе механизмов с параллельной кинематической структурой. Роботы-гексаподы реализуют задачи точного позиционирования объектов управления в шести степенях подвижности.

Области использования гексапода постоянно расширяются: особенно актуально применение в космической и медицинской сферах. Гексаподы активно внедряются в космическую технику, где они с большой точностью позиционируют радиолокационную и другую аппаратуру. Благодаря высокой грузоподъемности и жесткости, гексапод способен выдерживать большие нагрузки, что является его преимуществом, перед другими типами роботов. В медицинских приложениях рассматриваемый робот позволяет с высокой точностью позиционировать хирургические инструменты, выполнять ими операции, а также управлять другим оборудованием.

Гексапод также представляет интерес в сфере образования – он является ярким примером развития технологий и может использоваться в лабораторных работах, позволяя студентам более подробно ознакомиться со структурой и задачами управления роботами параллельной структуры.

Повышение показателей точности позиционирования гексаподов напрямую связано с решением задачи калибровки, в ходе которой определяются действительные значения геометрических параметров звеньев механизма. Целью настоящей работы является обзор существующих методов калибровки гексапода, анализ которых положен в основу разрабатываемого подхода к калибровке с применением системы технического зрения.

Одним из первых, кто описал кинематику гексапода, считается англичанин В.Е. Гью (V.E. Gough) [1], сделавший это в 1956 году. Стюарт (D. Stewart) улучшил его конструкцию в своей статье 1965 года. Позже аналогичные платформы стали называть платформой Гью-Стюарта, а шестиногих роботов, основанных на платформе Гью-Стюарта - гексаподами.

Гексапод представляет из себя шестиногого параллельного робота-манипулятора (см. рис. 1), состоящего из двух платформ (подвижной и неподвижной), соединенных между собой шестью независимыми телескопическими стойками. Стойки выполнены на базе линейных приводов, которые крепятся к платформам с помощью шарниров. Линейные приводы способны изменять свою длину, тем самым перемещая подвижную платформу с шестью степенями свободы: тремя поступательными (вдоль осей X, Y, Z) и тремя вращательными (крен, тангаж, рыскание).

Управление подобными роботами построено на решении обратной задачи кинематики (ОЗК) [2], которое напрямую зависит от геометрических параметров робота в целом, и от погрешности размеров линейных приводов и шарниров в частности. На управление влияют ошибки самой системы управления, ошибки, вызванные температурными расширениями и сжатиями, геометрические ошибки, а также систематические ошибки работы линейных приводов (погрешность параметров электромеханической части и пр.) и ошибки, вытекающие из деформации конструкции под нагрузкой.



Рис. 1. Внешний вид гексапода

Цель калибровки – снизить общую ошибку управления системой до минимума за счет устранения источника ошибок либо за счет их компенсации.

Устранения геометрических и температурных ошибок можно достичь путем применения материалов с малым коэффициентом теплового расширения, а также использованием качественных механических передач. Но такое решение ведет за собой существенное удорожание конструкции, поэтому в данной работе предлагается компенсировать влияние систематических ошибок линейного привода за счет изменения математической модели, на основе которой построена система управления гексаподом.

Предполагается, что в процессе работы манипулятора нагрузка на него будет постоянно менять значение и направление или гексапод сам будет менять свою ориентацию, следовательно для учитывания деформации конструкции при управлении и калибровке необходимо иметь датчики, для отслеживания этих параметров, такие как акселерометры.

В данной работе рассматривается калибровка при неизменяющихся условиях, таких как постоянные температура, нагрузка и ориентация гексапода. Предполагается, что систематическая ошибка, вызванная данными условиями, также остается постоянной. Тогда проведение калибровки при заданных условиях способно скомпенсировать эти ошибки.

В отличие от роботов с последовательной структурой (сварочные манипуляторы, гуманоидные роботы, роботы-схваты), роботы с параллельной структурой (см. рис. 2) имеют замкнутый кинематический контур, что означает однозначность решения ОЗК. Иными словами, применительно к гексаподу, каждому положению подвижной платформы соответствует единственная конфигурация линейных приводов и шарниров.

В настоящее время существуют методы калибровки гексаподов, предполагающие итерационное снижение ошибки управления с помощью использования сложного и дорогостоящего оборудования, такого как оптические интерферометры, внешние контрольно-измерительные приборы и лазерные трекеры.

Существуют также методы, подразумевающие использование встроенных в структуру гексапода датчиков [3]. Подобный подход способен обеспечить необходимую точность позиционирования, но при этом существенно удорожает стоимость конечной конструкции.

Также имеют развитие альтернативные методы калибровки, такие как использование систем технического зрения, акселерометров или энкодеров. Данные методы все еще могут уступать традиционным в точности настройки, но уже позволяют снизить зависимость процесса калибровки от внешнего оборудования.

Хотя реализация у вышеперечисленных методов разная, у большинства из них суть сводится к определению координат исполнительного инструмента гексапода для дальнейшего решения ОЗК и получения настолько точных значений параметров гексапода (длины стоек, ориентация шарниров), насколько точно получены координаты инструмента.

В данной статье предлагается метод калибровки, в процессе которого координаты подвижной платформы гексапода определяются с помощью системы технического зрения (СТЗ). СТЗ позволяют избежать использование сложных устройств для позиционирования робота. Такие системы реализуются с помощью цифровых устройств и программного обеспечения.

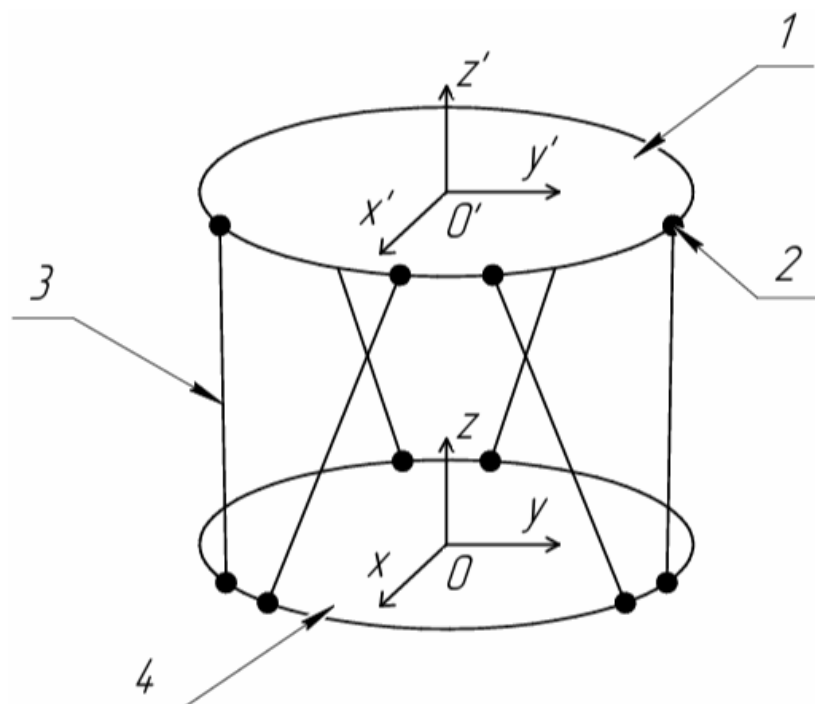


Рис. 2. Структура гексапода: 1 – подвижная платформа, 2 – шарнир, 3 – стойка, 4 – неподвижная платформа

Метод заключается в том, чтобы закрепить на гексапод лазерный указатель в качестве исполнительного инструмента так, чтобы он был перпендикулярен подвижной платформе. Затем гексапод устанавливается напротив специальной мишени (см. рис. 3) диаметром 2 метра на расстоянии 5 метров от нее (это обеспечивает возможность отслеживания указателя лазера при наклоне подвижной платформы до 21 градуса включительно). Мишень представляет собой гладкий круг окрашенный в цвет, контрастирующим с цветом лазера указателя (это необходимо для корректной работы СТЗ). К мишени с помощью кронштейна монтируется камера, которая охватывает мишень с находящейся внутри точкой от лазерного указателя. Из изображения, полученного камерой, с помощью специального ПО, извлекаются координаты точки указателя в системе координат привязанной к камере, которые затем переносятся в систему координат гексапода, что позволяет определить координаты лазерного указателя (см. рис. 2), и, как следствие, координаты шарниров на стороне подвижной платформы.

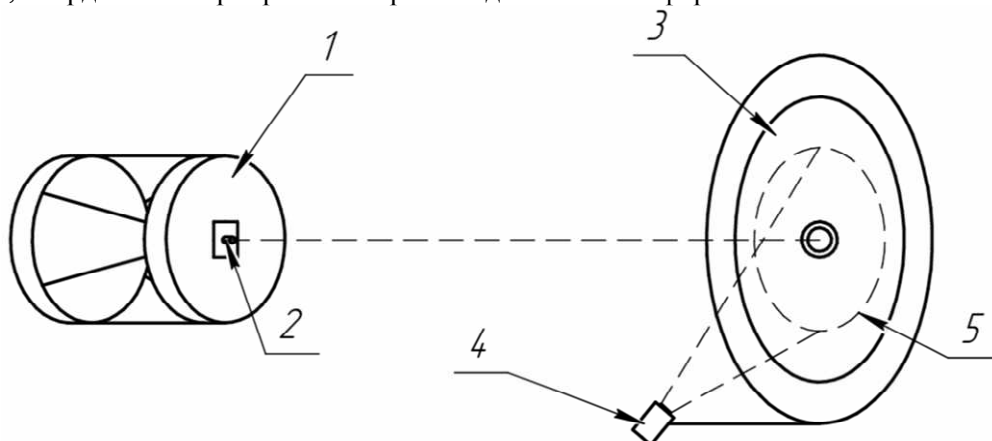


Рис. 3. Схема установки мишени с камерой и указателя, относительно гексапода: 1 – гексапод, 2 – лазерный указатель, 3 – мишень, 4 – камера, 5 – область мишени, захватываемая камерой

Дальнейшее решение ОЗК позволяет определить реальную длину, на которую выдвинулись штоки линейных приводов. После этого сравниваются фактические длины штоков (полученные в ходе решения ОЗК) и теоретические (заданные в системе управления). Разница между ними будет являться ошибкой управления. Данные записываются в систему управления (микропроцессор или интерфейс высокого уровня) в выделенный для хранения массив для того, чтобы учитываться в дальнейшем при управлении гексаподом. После этого производится перемещение штоков приводов на дискретный шаг и процесс определения фактических длин приводов повторяется, а набор данных, записываемых в систему управления, дополняется.

При этом дискретный шаг, с которым записываются данные, напрямую зависит от минимального шага хода штока, на который тот способен выдвинуться при воздействии задающего сигнала управления.

Поскольку при установке гексапода напротив мишени может выйти так, что из-за геометрических погрешностей или из-за конфигурации гексапода лазер закрепленного указателя будет попадать не в центр мишени, гексапод следует привести в «начальное положение». Под «начальным положением» понимается такое положение, при котором лазер указателя перпендикулярен мишени и направлен в ее центр, а длина выдвинутых штоков приводов минимальна.

После приведения манипулятора в начальное положение, предполагается использовать описанный выше метод получения координат исполнительного инструмента в рамках следующего алгоритма:

1. Изменение положения подвижной платформы, посредством изменения с определенным шагом длины телескопических стоек.

2. Определение новых координат лазерного указателя с помощью СТЗ.

3. Решение ОЗК и получение практических длин приводов и ориентации шарниров.

4. Вычисление суммарной ошибки управления каждым из приводов как разность между фактической длиной выдвинутого штока привода и длиной, предполагаемой системой управления.

5. Запись полученного набора ошибок в систему управления и изменение математической модели управления в соответствии с полученными данными.

6. Повторение пунктов 1-5 до тех пор, пока набор записываемых ошибок не позволит системе управления скомпенсировать систематические ошибки и повысить точность позиционирования до требуемой.

Фиксация одной из стоек перед выполнением первого пункта приведенного алгоритма позволяет повысить точность калибровки [4] (Shih-Ming Wang).

Так как шаг дискретизации сильно меньше, чем длина хода штока, то для записи формируемого набора данных о перемещениях по всей длине потребуется значительное количество памяти и такая запись может быть затруднительна при использовании системы управления гексаподом, основанной на микроконтроллере с ограниченным объемом памяти. Поэтому следует уменьшить размер массива записываемых данных. Так как весь формируемый набор поправок невозможно охарактеризовать одной единой функцией, то при решении данной задачи будет применяться метод локально кусочной интерполяции: при записи данных общий ряд значений разбивается на n -ое количество промежуточных наборов. В пределах каждого из наборов массив измеренных значений описывается одной функцией. Благодаря этому система управления способна динамически обращаться к сформированному массиву функций, находить функцию для нужного ей в конкретный момент времени участка и восстанавливать каждое значение из этого участка. Организация записи в память контроллер наборами функций позволяет существенно сэкономить объем занимаемой памяти.

Для решения задачи интерполяции можно использовать искусственную нейронную сеть [5], обученную на данных полного набора поправок.

Таким образом, данный метод позволяет скомпенсировать систематические ошибки и повысить точность позиционирования робота, при этом выигрывая у других методов в плане стоимости и простоты настройки.

В настоящее время ведется дальнейшая работа по разработке математической модели для СТЗ, позволяющей определять координаты метки с предельной точностью.

Список литературы

1. Stewart D. A platform with six degrees of freedom // Aircraft Engineering and Aerospace Technology. 1966, vol. 38, no. 4, pp. 30-35. doi.org/10.1108/eb034141.
2. Жуков Ю.А., Лычагин Ю.В., Слободзян Н.С. Решение задач кинематики гексапода в реальном времени // Материалы III Всероссийской научно-технической конференции молодых ученых, аспирантов и студентов. – Севастополь: Севастопольский государственный университет, 2017. – Т. 1. – С. 87-91.
3. Christian F., Steffen I. Model Calibration for a Rigid Hexapod-Based End-Effector with Integrated Force Sensors // Institute of Mechatronic Engineerin. 2021, vol. 21, no. 1, pp. 3537. doi.org/10.3390/s21103537.
4. Shih-Ming Wang, Kornel F. Ehmann. Error Model and Accuracy Analysis of a Six-DOF Stewart Platform // Journal of Manufacturing Science and Engineering. 2002, vol. 124, no. 2, pp. 286-295. doi.org/10.1115/1.1445148.
5. Вакуленко С.А., Жихарева А.А. Практический курс по нейронным сетям. Учебное пособие. – СПб.: Университет ИТМО, 2018. – 71 с.

Сведения об авторе:

Королев Родион Дмитриевич – студент.

ТЕХНИЧЕСКИЙ ПРОГРЕСС В ЭФФЕКТИВНОМ РАЗВИТИИ ОТРАСЛИ ОВЦЕВОДСТВА**Голембовский В.В., Паикова Л.А., Халимбеков Р.З.***Северо-Кавказский федеральный научный аграрный центр, Михайловск*

Ключевые слова: технологическое оборудование, овцеводство, зоотехнические мероприятия, эффективное производство, механизация, эффективность.

Аннотация. В представленной статье рассматриваются вопросы механизации отрасли овцеводства посредством усовершенствования и разработки отечественного вспомогательного оборудования. Особое внимание авторами уделяется механизации предприятий малых форм хозяйствования. На основе проведенных исследований авторы пришли к результатам: увеличение средней скорости продвижения овец на 0,03–0,05 м/с (или на 7,5–10,0%), пропускной способности на 348–380 голов в час (или на 24,0–29,0%) и уменьшение на 0,1 чел.-ч. при сборке раскола-накопителя для овец, что говорит о перспективности применения оборудования и его эффективности. Научная новизна и практическая значимость заключаются в расширении рынка отечественного оборудования и его доступности и подтверждаются полученными патентами. Материалы полезны для производителей в области овцеводства.

TECHNOLOGICAL PROGRESS IN THE EFFECTIVE DEVELOPMENT OF THE SHEEP BREEDING INDUSTRY**Golembovskii V.V., Pashkova L.A., Khalimbekov R.Z.***North Caucasus Federal Agrarian Research Centre, Mikhailovsk*

Keywords: technological equipment, sheep breeding, zootechnical measures, efficient production, mechanization, effectiveness.

Abstract. The presented article considers the issues of mechanization of the sheep breeding industry through the improvement and development of domestic auxiliary equipment. The authors pay special attention to the mechanization of small-scale enterprises. Based on the conducted research, the authors came to the following results: an increase in the average speed of sheep movement by 0.03–0.05 m/s (or by 7.5–10.0%), throughput by 348–380 heads per hour (or by 24.0–29.0%) and a decrease of 0.1 man-hour during assembly of the sheep split-storage unit, which indicates the prospects for using the equipment and its effectiveness. Scientific novelty and practical significance lie in the expansion of the market for domestic equipment and its availability and are confirmed by the obtained patents. The materials are useful for manufacturers in the field of sheep breeding.

Согласно принятому плану научно-исследовательской работы сотрудники ВНИИОК – филиала ФГБНУ «Северо-Кавказский ФНАЦ» работают над разработкой и усовершенствованием технических средств и элементов технологий при производстве продукции животноводства различных видов сельскохозяйственных животных.

Исследования проходили в условиях лаборатории в несколько этапов: теоретическая разработка опытного образца, разработка чертежей, изготовление опытных образцов и их апробация, технологическая оценка, включающая показатели (пропускная способность, средняя скорость продвижения, затраты времени на монтаж оборудования, случаи травматизма), редакция рабочих чертежей и опытных образцов оборудования, производственные испытания.

Представленное Вашему вниманию вспомогательное оборудование – разборная клетка и раскол-накопитель для овец с 2021 года зарекомендовали себя как надёжный и эффективный единый мобильный комплекс технологического оборудования для овец, проходящий производственные испытания в условиях ЗАО «Племенной завод имени Героя социалистического труда В.В. Калягина» и опытной станции ВНИИОК – филиала ФГБНУ «Северо-Кавказский ФНАЦ» Ставропольского края, задействованный при взвешивании поголовья, взятии промеров, бонитировки и зооветеринарных манипуляций (рис. 1).

Данный комплекс вспомогательного оборудования в технологии ведения отрасли овцеводства экспонировался на выставке МВЦ «Минводы ЭКСПО» в 2021 году и зарекомендовал себя как надёжный эффективный и портативный.



Рис. 1. Раскол-накопитель и разборная клетка для овец с разных ракурсов

Модернизированный раскол-накопитель для овец характеризуется идентичными соединёнными между собой панелями из профильной квадратной металлической трубы с техническими отверстиями и снабжёнными специальными петлями изогнутой формы по краям панели, при этом, направлены они внутренним углом друг к другу, соединённые между собой стальной осью.

Технологическая оценка осуществлялась по комплексу показателей на поголовье маток кавказской породы и складывалась из дублирующих (серийных) испытаний с выведением среднего значения по каждому показателю (табл. 1).

Табл. 1. Оценка функциональности раскола-накопителя

Показатель	Значение
Время прохождения овец через раскол, с	1489
Средняя скорость продвижения животного, м/с	0,51
Пропускная способность, гол./ч.	1825
Случаи травматизма овец	–

Полученные результаты сравнивали с ранее разработанным расколом сотрудниками Всесоюзного Ордена Трудового Красного Знамени научно-исследовательского института овцеводства и козоводства, при котором увеличение средней скорости продвижения овец на 0,03-0,05 м/с (или на 7,5-10,0%), пропускной способности на 348-380 голов в час (или на 24,0-29,0%) и уменьшение на 0,1 чел.-ч. при сборке.

При разработке чертежей параметров конструкций основывались на нормативных показателях, указанных в Системе рекомендательных документов агропромышленного комплекса Министерства сельского хозяйства Российской Федерации [1].

Таким образом, конструкция раскола-накопителя может принимать любую конфигурацию с учётом рельефа местности и выполняемой работы, содержать отсекающие калитки, способствующие накоплению, направленному движению и разделению овец, сортировки, отбивки и проведении иных ветеринарно-профилактических и зоотехнических мероприятий.

Востребованность и эффективность представленного оборудования подтверждается патентами [2, 3].

Разработанная разборная клетка для овец, в свою очередь, выполнена из металлического профиля и сконструирована с учётом установки напольных платформенных или балочных весов. Если рассматривать разборную клетку как самостоятельную единицу, то она обладает универсальностью, лёгкостью монтажа и демонтажа, транспортировки и способствует частичной автоматизации, приводящей к сокращению затрат ручного труда и увеличению пропускной способности. Так же включает в свою конструкцию механизм фиксации животного, зажим фиксации головы, регулирующую ширину клетки посредством свинчивания боковых стенок, окно для бонитировки (рис. 2).



Рис. 2. Разборная клетка для овец в производстве

Случаи травматизма овец не были зарегистрированы.

Следовательно, доказано значительное сокращение трудозатрат при подаче овец, увеличение пропускной способности и средней скорости продвижения овец, уменьшение времени на монтаж раскола-накопителя.

Полученные результаты позволяют считать целесообразным применение усовершенствованного раскола-накопителя и разработанной клетки для овец, способствующих снижению затрат на единицу продукции и повышению производительности труда с экономической эффективностью работы с животными.

Список литературы

1. РД-АПК 1.10.03.02-12. Система рекомендательных документов агропромышленного комплекса Министерства сельского хозяйства Российской Федерации. Методические рекомендации по технологическому проектированию. Методические рекомендации по технологическому проектированию овцеводческих объектов (утв. и введены в действие Минсельхозом России 06.07.2012). Министерство сельского хозяйства РФ; Система рекомендательных документов агропромышленного комплекса. – М., 2012. – 100 с.
2. Патент №2783532 РФ. Раскол-накопитель для овец / А.В. Лях, В.В. Голембовский, Д.Е. Белов, Л.А. Пашкова, Г.А. Черкашина, Р.З. Халимбеков. – Заявка №2021133857 от 06.04.2021; опубл. 14.11.2022, Бюл. №32.
3. Патент №207255 РФ. Разборная клетка для овец / А.И. Суров, В.В. Голембовский, Р.З. Халимбеков, Л.А. Пашкова, Г.А. Черкашина. – Заявка №202111564 от 22.04.2021; опубл. 20.10.2021, Бюл. №29.

Сведения об авторах:

Голембовский Владимир Владимирович – к.с.-х.н., ведущий научный сотрудник;

Пашкова Лариса Александровна – к.с.-х.н., ведущий научный сотрудник;

Халимбеков Рустам Зубайруевич – младший научный сотрудник.

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ПАРАМЕТРОВ ШИН НА ТЯГОВЫЕ КАЧЕСТВА АВТОМОБИЛЯ ПОВЫШЕННОЙ ПРОХОДИМОСТИ

Марцинковский С.А., Татаринцев В.Ю., Артёмов А.В., Школьных А.В., Прядкин В.И.
Воронежский государственный лесотехнический университет им. Г.Ф. Морозова, Воронеж

Ключевые слова: параметры шин, проходимость, тяговые качества, математическая модель, буксование, почва, колёсный движитель, автомобиль, шина сверхнизкого давления, параметры движения.

Аннотация. В статье рассматривается влияние параметров шин 265/65R18 и 900×500–16 «Шаина-2» на тяговые качества автомобиля повышенной проходимости. Разработана математическая модель, позволяющая определять реакции, возникающие при качении колеса и коэффициент буксования. Выявлено, что шина 900×500–16 «Шаина-2» обеспечивает более стабильный режим движения по слабонесущим грунтам.

INVESTIGATION OF THE INFLUENCE OF TIRE PARAMETERS ON THE TRACTION QUALITIES OF AN ALL-TERRAIN VEHICLE

Martsinkovsky S.A., Tatarintsev V.Yu., Artyomov A.V., Shkolnykh A.V., Pryadkin V.I.
Voronezh state forestry engineering University named after G.F. Morozov, Voronezh

Keywords: tire parameters, cross-country ability, traction qualities, mathematical model, slipping, soil, wheel propulsion, car, ultra-low pressure tire, motion parameters.

Abstract. The article examines the influence of tire parameters 265/65R18 and 900×500-16 "Shaina-2" on the traction qualities of an all-terrain vehicle. A mathematical model has been developed that makes it possible to determine the reactions that occur during rolling of the wheel and the coefficient of slipping. It was revealed that the 900×500-16 tire "Shaina-2" provides a more stable driving mode on light-bearing soils.

В условиях эксплуатации транспортных средств на слабонесущих грунтах (почвах различной плотности, песок и т.п.) существенно снижается эффективная передача крутящего момента на движитель из-за проскальзывания и упругопластических деформаций грунта [1, 2].

Задача данной модели – описать процесс установления тягового равновесия автомобиля, оснащённого четырьмя ведущими колёсами при движении по полю.

Цель – разработать математическую модель, позволяющую на основе заданных параметров (масс автомобиля, геометрии и характеристик шин, свойств грунта) определить реакции, возникающие при качении колеса, определить коэффициент буксования и удельный запас по тяге для различных типов шин, установленных на автомобиль повышенной проходимости.

Модель предусматривает исследование данного автомобиля в стандартном исполнении с шинами 265/60R18 и в модификации на шинах сверхнизкого давления модели Шаина-2 размерностью 900×500-16.

Параметры двух типов шин (265/65R18 и 900×500-16 «Шаина-2»), используемые в модели приведены в таблице 1. Указанные значения непосредственно задействованы в уравнениях, и находятся в программном коде, лежащем в основе разработанной модели [2, 3].

Табл. 1. Характеристики двух типов шин, используемых в модели

Параметр	Шина	
	265/65R18	900×500-16 «Шаина-2»
Обозначение в коде	tires(1)	tires(2)
радиус качения колеса, r_k , м	0,36	0,42
Момент инерции, I_k , кг·м ²	1,8	4,8
Коэффициент сопротивления, f	0,052	0,017
Коэффициент сцепления, $\mu_{\max}$	0,26	0,5
Удельная касательная сила в момент 100%-го буксования, μ_{stat}	0,1	0,1

Блок описания движения автомобиля как целого (поступательная динамика по оси x), который описывается выражением:

$$m \frac{dv}{dt} = n \cdot F_{\text{trac}} - F_{\text{roll}}(n) - F_{\text{don}}(v), \quad (1)$$

где v – скорость автомобиля, м/с; m – масса автомобиля, кг; F_{trac} – суммарная тяговая сила от n ведущих колес, Н; F_{roll} – сила сопротивления качению, Н; F_{don} – дополнительные силы сопротивления движению, Н.

Блок описания динамики вращения колеса представлен зависимостью:

$$I_k \frac{d\omega}{dt} = M_{kol} - F_{resist}, \quad (2)$$

где ω – угловая скорость колеса, рад/с; I_k – момент инерции колеса, кг·м²; m – масса автомобиля, кг; M_{kol} – крутящий момент, подводимый к колесам, Нм; M_{resist} – суммарный момент сопротивления (включающий момент сопротивления качению, вязкое сопротивление, потери на буксование и т. п.), Нм;

Блок расчета буксования представлен в виде функции:

$$s = \frac{\omega \cdot r_k - v}{\max(\omega \cdot r_k, 0.01)}, \quad (3)$$

Блок расчета удельного запаса по тяге выражен функцией, показывающей, какой процент от максимально реализуемого шинами коэффициента сцепления может быть использован для преодоления активной тяговой нагрузки:

$$\Delta\mu = \mu_{\max} - \mu(s), \quad (4)$$

где $\mu_{\max}$ – коэффициент сцепления шины в заданных условиях; $\mu(s)$ – удельная касательная сила в контакте колеса с почвой в реальный момент времени.

Грунт, по которому движется автомобиль, определяется такими параметрами как коэффициент сцепления $\mu_{\max}$; остаточная удельная касательная сила μ_{stat} при буксовании $s \rightarrow 1$ и коэффициент сопротивления качению f . Колесо автомобиля в данной модели рассматривается как жесткий диск радиуса r_k с моментом инерции I_k . В рассматриваемой математической модели подразумевается, что силовой агрегат выдает суммарный выходной крутящий момент M_{kol} , равномерно распределяемый на n колес автомобиля. Начало движения автомобиля сопровождается линейным ростом момента с нуля до максимального значения, определяемого условиями движения, а не характеристиками двигателя. Коэффициент буксования s (slipratio) определяется формулой (3). При этом на данную зависимость накладывается ряд ограничений, с целью повышения адекватности её работы в переходных, неустановившихся режимах. Удельный запас по тяге (4) определяется разностью между максимально достижимым в заданных условиях и для заданной шины коэффициентом сцепления и текущим значением [3-5].

Разработанная математическая модель позволяет получить ряд временных диаграмм, отражающих ключевые параметры движения автомобиля, оснащенного разными типами шин (265/60R18 и 900×500-16). Особую информативность отражают графики зависимости буксования (рис. 1) и удельного запаса по тяге (рис. 2).

При старте, когда крутящий момент двигателя быстро возрастает, буксование заметно возрастает. При этом пиковые значения буксования для шин 265/60R18 достигают 0,67 (67%). Интенсивное буксование происходит в течение 2,5 секунд, затем плавно снижается и достигает минимальных значений 0,077 (7,7%) после окончания разгона. Данная величина буксования сохраняется на всем диапазоне установившегося движения [6, 7].



Рис. 1. Зависимость коэффициента буксования от времени

Шина сверхнизкого давления 900x500-16 имеет лучшие сцепные качества, коэффициент буксования при разгоне не превышает 0,11 в начальный момент времени. Затем при разгоне коэффициент буксования находится на уровне 0,067, а в режиме установившегося движения не превышает 0,02.

Зависимость, представленная на рисунке 2 характеризует разность между коэффициентом сцепления и фактическим текущим значением удельной касательной силы μ . Эта величина служит удобным показателем того, насколько далеко текущий режим находится от режима потери сцепления.

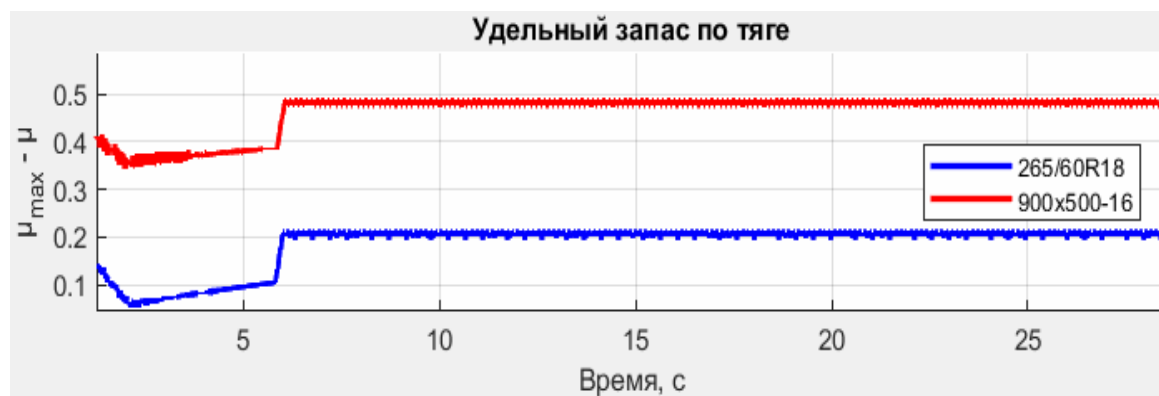


Рис. 2. Зависимость удельного запаса по тяге от времени

При анализе кривых можно заметить, что для шины 265/60R18 в первые секунды разгона запас по тяге быстро уменьшается, и достигает минимального значения – 0,07. Это означает, что фактическое сцепление почти достигает своего пикового предела, следовательно, возрастает шанс серьёзного буксования или потери возможности движения.

В отличие от этого, шина сверхнизкого давления 900×500-16 располагает более внушительным запасом по сцеплению практически на всём промежутке разгона. Только в самые начальные моменты (запас кратковременно снижается до 0,34, но все равно держится на заметно выше, чем у шины 265/60R18 [8, 9].

Выводы

1. Проведённый анализ временных диаграмм, продемонстрировал влияние конструктивных особенностей шин на тяговые свойства машины в условиях слабонесущих грунтов. Показано, что шина 900×500-16 благодаря повышенному коэффициенту сцепления и меньшему сопротивлению качению обеспечивает более стабильный режим разгона, сниженный уровень буксования и более высокий запас по тяге, чем шина 265/60R18.

2. Установлено, что разработанная математическая модель корректно отражает основные закономерности взаимодействия колёсного движителя с деформируемым грунтом и позволяет объективно оценивать влияние ширины профиля и структуры шины на тягово-скоростные характеристики автомобиля.

Список литературы

1. Прядкин В.И. Мобильные энергосредства сельскохозяйственного назначения на шинах сверхнизкого давления: Автореф. дисс. ... докт. техн. наук.. – М., 2013. – 351 с.
2. Прядкин В.И., Шапиро В.Я., Годжаев З.А., Гончаренко С.В. Транспортно-технологические средства на шинах сверхнизкого давления. – Воронеж: ВГЛУ, 2019 – 492 с.
3. Зайцев С.Д., Стреблеченко Л.С., Гончаренко С.В., Прядкин В.И. Экспериментальная оценка тягово-сцепных качеств широкопрофильной шины // Тракторы и сельскохозяйственные машины. – 2010. – № 8. – С. 25-27.
4. Тарасик В.П. Математическое моделирование прямолинейного движения автомобиля // Автомобильная промышленность. – 2017. – № 10. – С. 19-23.
5. Калугин А.А. Повышение эффективности машин с колёсной формулой 4×2 при движении на скользких и грязных несущих поверхностях // Известия Оренбургского государственного аграрного университета. – 2016. – № 5(61). – С. 50-54.
6. Ким Ю.А., Насковец М.Т., Жарков Н.И., Гиль В. И. Повышение проходимости колесных машин за счет регулирования давления воздуха в шинах // Труды БГТУ. Серия 1: Лесное хозяйство, природопользование и переработка возобновляемых ресурсов. – 2022. – № 2(258). – С. 125-129. – DOI: 10.52065/2519-402X-2022-258-2-125-129.
7. Фаталиев Н.Г., Фатахов М.М., Фаталиев Ф.Р. Определение тяговых и динамических качеств // Актуальные проблемы и перспективы развития дорожно-транспортного комплекса: сборник научных трудов 3-й международной научно-практической конференции, Махачкала, 05–06 апреля 2017 года / ФГБОУ ВО «Московский автомобильно-дорожный государственный технический университет (МАДИ)», Махачкалинский филиал. – Махачкала: Б.и., 2017. – С. 117.
8. Татаринцев В.Ю., Артемов А.В., Снятков Е.В., Прядкин В.И. Повышение адаптивности колёсных движителей на мобильных средствах: проблемы и пути решения // Перспективные направления развития автомобильной отрасли и подготовка кадров: Материалы Всероссийской научной

конференции, Воронеж, 16 октября 2024 года. – Воронеж: Воронежский государственный лесотехнический университет им. Г.Ф. Морозова, 2024. – С. 150-160.

9. Казаков Ю.Ф., Медведев В.И., Батманов В.Н., Ильин В.В. Повышение эксплуатационных характеристик колесных движителей // Инновационное развитие агропромышленного комплекса как фактор конкурентоспособности: проблемы, тенденции, перспективы: Коллективная монография. Часть 1. – Киров: Вятская государственная сельскохозяйственная академия, 2020. – С. 230-250.

Сведения об авторах:

Марцинковский Сергей Александрович – магистрант;

Татаринцев Василий Юрьевич – преподаватель кафедры автомобилей и сервиса;

Артёмов Артём Владимирович – старший преподаватель кафедры автомобилей и сервиса;

Школьных Александр Васильевич – ассистент кафедры автомобилей и сервиса;

Прядкин Владимир Ильич – д.т.н., профессор кафедры автомобилей и сервиса.

СИСТЕМА ПОДДЕРЖКИ ПРИНЯТИЯ РЕШЕНИЙ ДЛЯ ОПЕРАТИВНОГО УПРАВЛЕНИЯ ПРОЦЕССОМ ГИДРООЧИСТКИ

Гордеева Д.С., Веревкин А.П.

Уфимский государственный нефтяной технический университет, Уфа

Ключевые слова: гидроочистка, температурный профиль, состав сырья, физико-химическое моделирование, оперативное управление система принятия поддержки решений.

Аннотация. В современной нефтепереработке, в связи с повышением требований к содержанию серы в топливе, актуальна задача оперативного контроля, оптимизации управления процессом гидроочистки. Для решения данной задачи предлагается система поддержки принятия решений, использующая физико-химическое и когнитивное моделирование процесса, и логические правила формирования решений по управлению на основе сравнения температурных профилей текущего состояния и прецедентов. Оценивается состав сырья, рассчитывается оптимальная температура сырья на входе в реактор, обеспечивающая поддержание регламентируемого качества продукции.

DECISION SUPPORT SYSTEM FOR OPERATIONAL MANAGEMENT OF THE HYDROTREATING PROCESS

Gordeeva D.S., Verevkin A.P.

Ufa State Petroleum Technological University, Ufa

Keywords: hydrotreating, temperature profile, composition of raw materials, physico-chemical modeling, operational management, decision support system.

Abstract. In modern oil refining, due to the increased requirements for the sulfur content in fuel, the task of operational control and optimization of the management of the hydrotreating process is urgent. To solve this problem, a decision support system is proposed that uses physico-chemical and cognitive modeling of the process, and logical rules for making management decisions based on a comparison of temperature profiles of the current state and use cases. The composition of the raw materials is evaluated, and the optimal temperature of the raw materials at the reactor inlet is calculated, ensuring the maintenance of regulated product quality.

Процесс гидроочистки играет важную роль в современной нефтепереработке, обеспечивая удаление нежелательных компонентов, таких как сернистые, азотистые и кислородсодержащие соединения, из нефтяных фракций [1, 2]. С ужесточением экологических требований к содержанию серы в топливе [3] задача оптимизации и совершенствования оперативного контроля процесса гидроочистки становится все более актуальной.

Традиционные методы управления процессом гидроочистки часто основываются на опыте операторов и периодических лабораторных анализах состава сырья и продукции. Однако, изменчивость состава сырья и динамичный характер процесса требуют более гибкого и адаптивного подхода [4,5]. Поэтому разработка и внедрение систем поддержки принятия решений (СППР) на основе комбинирования строгого физико-химического и когнитивного моделирования процессов гидроочистки представляется перспективным направлением для повышения эффективности и надежности работы установок.

Предлагаемая СППР основана на интеграции физико-химической модели процесса гидроочистки с базой данных, содержащей информацию о различных режимах работы установки и соответствующих составах сырья. Эти данные представляются как множество прецедентов.

Создается детальная модель процесса гидроочистки, учитывающая основные реакции удаления сернистых соединений. Модель включает кинетические уравнения реакций, термодинамические свойства компонентов и параметры катализатора.

Особое внимание уделяется учету тепловых эффектов каждой реакции. Тепловой эффект, выделяемый или поглощаемый при реакции, напрямую связан с составом сырья и степенью превращения компонентов.

Модель учитывает влияние режимных параметров, таких как температура, давление, расход сырья, кратность циркуляции ВСГ, на скорость реакций и тепловой баланс реактора. На основе разработанной модели рассчитывается теоретический температурный профиль в реакторе для различных составов сырья и режимных параметров. Температурный профиль рассматривается как индикатор протекания тех или иных реакций. Участки с резким изменением температуры указывают на интенсивное протекание экзо- или эндотермических реакций.

Одновременно с температурным профилем рассчитывается изменение содержания серы по слоям реактора.

Модель используется для определения оптимальной температуры в реакторе для заданных режимных параметров и требуемого содержания серы на выходе. Оптимальная температура определяется как минимальная температура, при которой обеспечивается соблюдение нормативных

требований по содержанию серы. Минимизация температуры позволяет снизить энергопотребление и продлить срок службы катализатора [6].

Блок-схема компонентов разрабатываемой СППР представлена на рисунке 1.

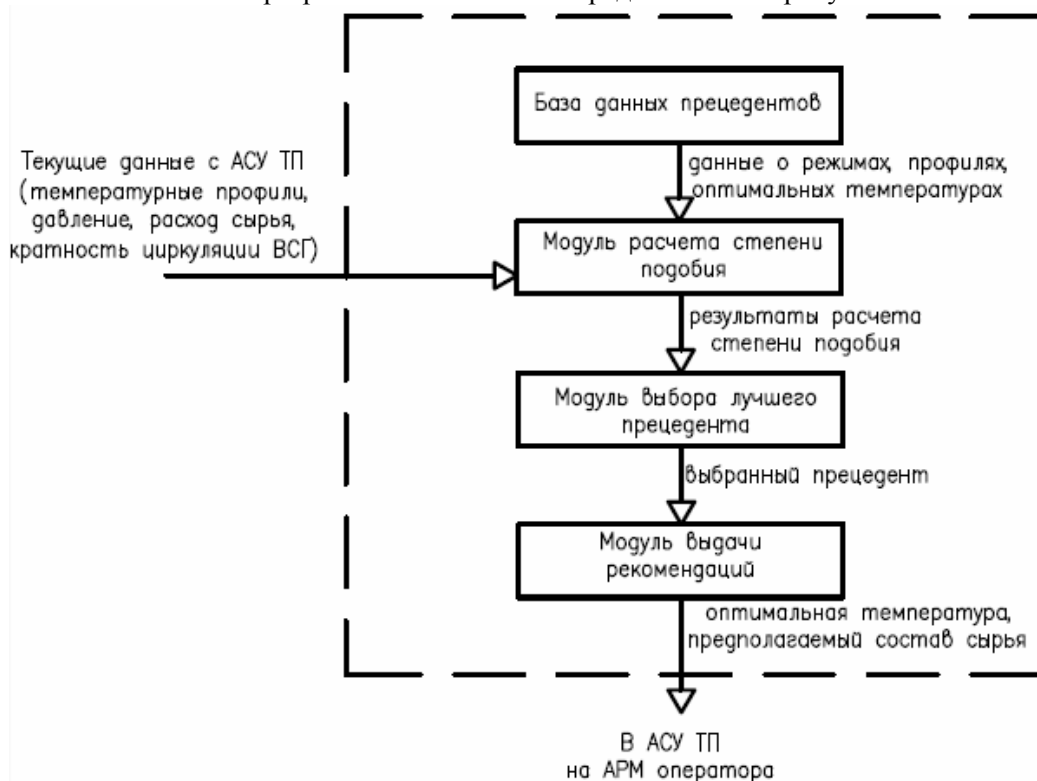


Рис. 1. Блок-схема компонентов СППР

На основе результатов моделирования создается база данных (база прецедентов), содержащая информацию о различных составах сырья, соответствующих режимных параметрах (температура, давление, расход, кратность циркуляции ВСГ), теоретических температурных профилях, предполагаемом изменении содержания серы по слоям и оптимальных температурах. База данных структурируется таким образом, чтобы обеспечить быстрый поиск наиболее подходящего режима работы установки для заданного состава сырья.

СППР сравнивает текущие данные с информацией, содержащейся в базе данных (модуль расчета степени подобия). Первоначально, система, используя логические правила, отбирает прецеденты с наиболее близкими значениями режимных параметров (температура, давление, расход сырья, кратность циркуляции ВСГ). Затем, среди отобранных прецедентов, СППР сравнивает текущий температурный профиль с профилями из базы данных. На основе этой аналогии определяется предполагаемый состав сырья и выбирается наиболее подходящий прецедент (модуль выбора лучшего прецедента).

В результате формируются рекомендации по оптимальной температуре на входе в реактор (модуль выдачи рекомендаций). Сформированные рекомендации передаются на автоматизированное рабочее место (АРМ) оператора для анализа и принятия решения. Оператор, проанализировав рекомендации, принимает окончательное решение и при необходимости вносит изменения в параметры процесса через интерфейс АСУ ТП. Команды оператора передаются на исполнительные механизмы через ПЛК АСУ ТП.

Важно отметить, что СППР предоставляет оператору рекомендательную информацию и не имеет прямого доступа к исполнительным механизмам. Такая валидация информации гарантирует безопасность и надёжность управления технологического процесса.

СППР интегрируется в существующую АСУ ТП в качестве дополнительного модуля через OPC-сервер, не заменяя существующие компоненты.

Разработка и внедрение СППР на основе моделирования тепловых эффектов и анализа температурного профиля представляет собой перспективное направление для повышения эффективности и надежности работы установок гидроочистки. Предлагаемая система позволит операторам оперативно управлять процессом, обеспечивать требуемое качество продукции и минимизировать эксплуатационные затраты. Внедрение такой системы потребует проведения детального физико-химического моделирования процесса гидроочистки, создания базы данных и разработки пользовательского интерфейса для операторов. Однако, ожидаемый эффект от внедрения СППР оправдывает затраченные усилия.

Список литературы

1. Солодова Н.Л., Терентьева Н.А. Гидроочистка топлив: учебно-методическое пособие. – Казань: Изд-во КГТУ, 2008. – 63 с.
2. Кондрашева Н.К., Кондрашев Д.О. Технологические расчеты и теория процесса гидроочистки. – Уфа: ООО «Монография», 2008. – 106 с.
3. Чернышева Е.А., Дауди Д.И., Нуржиц С.И. Евро-6 без оксигенатов // Neftegaz.RU [Электронный ресурс]. – 2020. – №9. – URL: <https://magazine.neftegaz.ru/articles/pererabotka/631384-evro-6-bez-oksigenatov/>
4. Веревкин А.П., Муртазин Т.М. Искусственный интеллект в задачах моделирования, управления, диагностики технологических процессов. Монография. – Москва; Вологда: Инфра-Инженерия, 2023. – 232 с.
5. Гурьева Е. М., Кольцов А. Г. Применение виртуальных анализаторов для определения качества нефтепродуктов // Динамика систем, механизмов и машин. – 2019. – № 4. – С. 296-301.
6. Krivtcova N.I., Tataurshikov A.A., Ivanchina E.D., Krivtsov E.B. Mathematical modelling of diesel fuel hydrodesulfurization kinetics // Procedia Chemistry. 2015, no. 15, pp. 180-186.

Сведения об авторах:

Гордеева Дарья Сергеевна – магистрант;

Веревкин Александр Павлович – д.т.н., профессор.

НАЛИПАНИЕ ВЯЗКИХ НЕФТЕПРОДУКТОВ НА КОАЛЕСЦИРУЮЩУЮ НАСАДКУ

Петров М.Н., Ратасен М.А.

Санкт-Петербургский государственный технологический институт (технический университет),
Санкт-Петербург**Ключевые слова:** нефтеулавители, нефтеловушки, коалесценция, коалесцеры, адгезия, налипание.**Аннотация.** Рассмотрен механизм слияния и укрупнения капель под действием сил поверхностного натяжения на коалесцирующей насадке и условие их отрыва под действием силы Архимеда и силы сопротивления набегающему потоку, экспериментально показана неприменимость коалесцирующей насадки при превышении сил адгезии суммарной силы отрыва.

STICKING OF VISCOUS OIL PRODUCTS TO COALESCING PACKING

Petrov M.N., Ratasep M.A.

Saint Petersburg State Technological Institute (Technical University), Saint-Petersburg

Keywords: oil separators, oil traps, coalescence, coalescers, adhesion, sticking.**Abstract.** The mechanism of merging and coarsening of droplets under the action of surface tension forces on the surface of coalescing packing and the condition of their separation under the action of the Archimedes force and the force of resistance to the oncoming flow are considered, the inapplicability of coalescing packing is experimentally shown when the adhesion forces exceed the total separation force.

Очистка стоков нефтеперерабатывающих заводов является важной и не до конца решенной практической задачей: при соблюдении действующих экологических норм в сбрасываемой воде остается значительное количество недоизвлеченных нефтепродуктов, которые загрязняют природу и образуют недополученную выгоду, т.к. могли бы быть использованы в производстве.

Извлечение капель размером порядка нескольких микрон в небольших концентрациях за счёт отстаивания практически невозможно, т.к. размеры частиц (10^{-6} м) становятся сопоставимы с размерами молекул (10^{-10} м) и равномерно распределяются по объему за счет броуновского движения [1].

Для того, чтобы укрупнить капли до размеров, при которых сила Архимеда будет превалировать над другими силами, используют коалесцирующие насадки, изготавливаемые из водоотталкивающих, или другими словами, гидрофобных или олеофильных материалов.

При взаимодействии с такой поверхностью капли воды отталкиваются, а капли нефтепродуктов наоборот – смачивают её и прилипают к ней. Механизм этого явления можно представить следующим образом: 1 – накопление микрокапель на олеофильной поверхности, 2 – слияние микрокапель, 3 – образование больших капель, 4 – отрыв большой капли от олеофильной поверхности под действием силы Архимеда и силы сопротивления набегающего потока, 5 – всплытие капли (см. рис. 1).

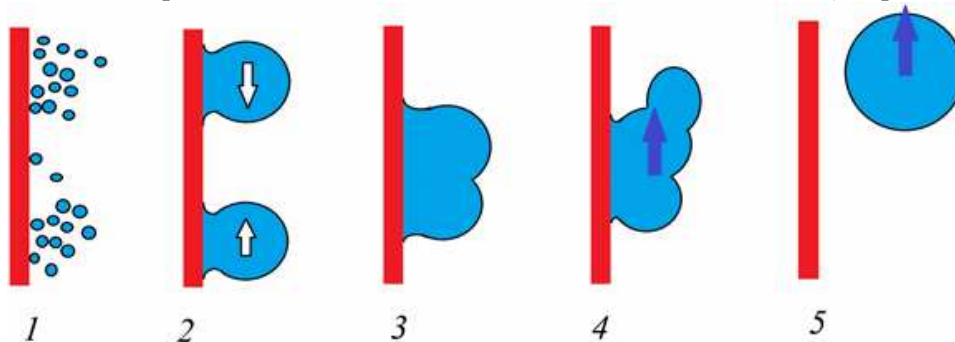


Рис. 1. Работа коалесцирующей насадки

Группе исследователей [2] удалось с помощью сканирующего электронного микроскопа запечатлеть процесс слияния капель воды на гидрофобной поверхности. Данный эксперимент является инверсией рассматриваемого процесса, но позволяет наглядно проанализировать явление коалесценции.

Они размещали две одинаковые по размеру капли воды радиусом $R \approx 1$ мм на расстоянии $2l$ друг от друга и следили за динамикой процесса (см. рис. 2).

После слияния и отрыва от поверхности крупные капли всплывают по закону Стокса в ламинарном режиме. Необходимо отметить, что закон Стокса будет справедлив только в определенном диапазоне размеров капель: когда размер капли превышает критический, режим всплытия становится турбулентным. Всплытие таких частиц становится медленнее из-за возникающего гидродинамического сопротивления. Однако они поднимаются все-равно достаточно быстро и поэтому могут быть легко удалены в аппаратах.

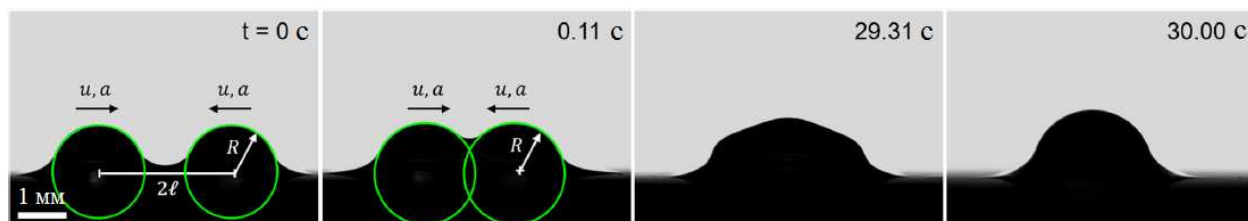


Рис. 2. Динамики коалесценции (скорость съемки 5000 кадров в секунду) [2]

Нами был проведен эксперимент (рис.3) по улавливанию остаточных нефтепродуктов на водоблоке. Экспериментальная установка представляла собой короб с блоком коалесцирующей насадки синусоидальной формы из олеофильной композиции. На входе и выходе отбирались пробы для дальнейшего анализа. В аппарате поддерживался ламинарный режим течения.



Рис. 3. Экспериментальный коалесцер

В результате проведенных экспериментов оказалось, что насадка эффективно улавливает нефтепродукты (41,5 мг/дм³) только в течение ограниченного времени (см. рис. 4), затем улавливающая способность насадки резко падает, происходит налипание нефтепродуктов на насадку – адгезивные силы начинают преобладать над всеми другими.

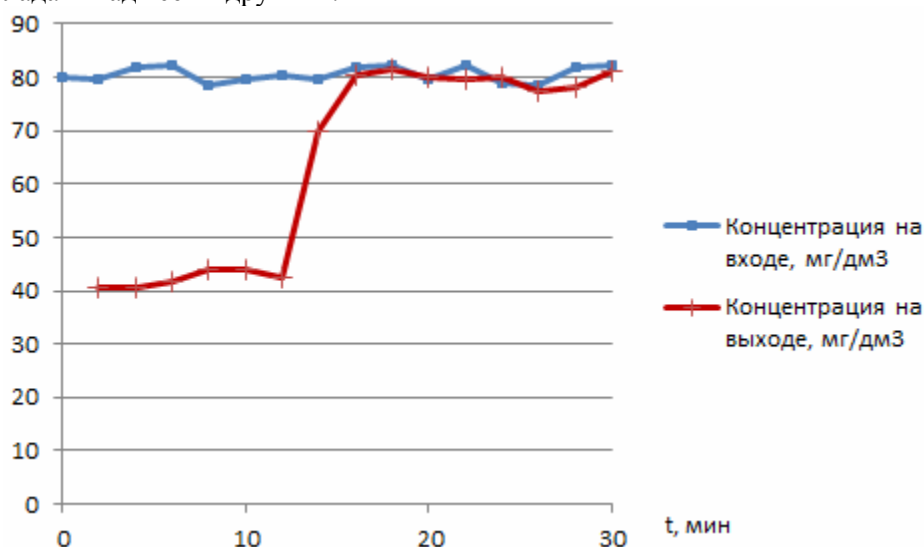


Рис. 4. Концентрация нефтепродуктов

В работе [3] было исследование влияние упаривания (выкипания) на адгезию нефти. Оказалось, что для лёгких нефтей, как правило, адгезия практически не меняется даже при сильном упаривании, а тяжелые нефти (Майя, Поинт Аргуелло, Лукула) имеют тенденцию к резкому увеличению адгезии даже после умеренного выкипания (рис. 5). Почти для всех исследовавшихся нефтей диапазон адгезии в зависимости от испарения находится в пределах одного порядка величины.

Можно предположить, что во время проведения эксперимента в водоблок на очистку попадали остатки тяжелых фракций, обладающие высокой адгезивной способностью. Состав и количество выбросов на НПЗ могут изменяться в широком диапазоне, что создает дополнительные трудности для эффективного нефтеулавливания.

Был сделан вывод, что для обеспечения нормальной непрерывной работы насадки в зависимости от состава поступающих нефтепродуктов требуется оперативно повышать подвижность налипающего слоя, что можно добиться введением растворителей или повышением температуры процесса.

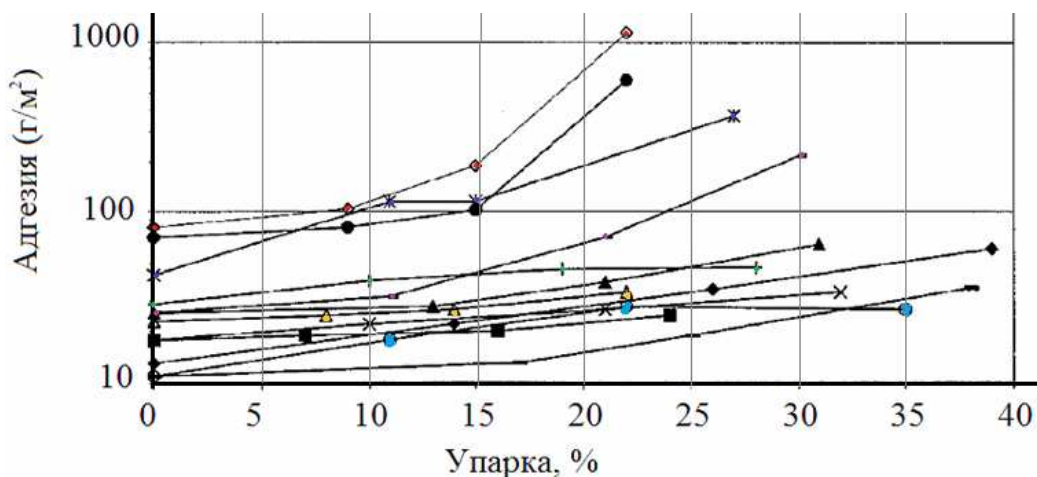


Рис. 5. Зависимость адгезии от выпаривания нефти [3]

Проведение исследования состава нефтепродуктов и выявления зависимости их вязких и адгезивных свойств в зависимости от температуры позволит сделать окончательный вывод о применимости коалесцирующей насадки и области её устойчивой работы.

Список литературы

1. Kirby S. Mohr, P.E. Mohr. How oil-water separators work and how to use them // Mohr Separations Research [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.acsseparations.com>
2. Naobo Xu, Yimin Zhou, Dan Daniel, Joshua Herzog, Xiaoguang Wang, Volker Sick, Solomon Adera. Droplet attraction and coalescence mechanism on textured oil-impregnated surfaces // Natura communications. 2023, vol. 14, p. 4901: <https://doi.org/10.1038/s41467-023-40279-w>.
3. Jokuty P., Whitar S., McRoberts K., Mullin J. Oil Adhesion Testing - Recent // Proceedings of the Nineteenth Arctic Marine Oilspill Program Technical Seminar, Environment Canada, Ottawa, Ontario. – URL: <https://www.bsee.gov/sites/bsee.gov/files/osrr-oil-spill-response-research/120bp.pdf>.

Сведения об авторах:

Петров Максим Николаевич – аспирант;

Ратасен Михаил Альбертович – к.т.н., доцент.

Научно-исследовательский центр «МашиноСтроение»
(НИЦ МС)

<http://srcms.ru/>

E-mail: info@srcms.ru

