**УЧЕНЫЕ ЗАПИСКИ КРЫМСКОГО ИНЖЕНЕРНО-ПЕДАГОГИЧЕСКОГО УНИВЕРСИТЕТА**

Государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования Республики Крым "Крымский инженерно-педагогический университет имени Февзи Якубова" *(Симферополь)*

Номер: **18** Год: **2009**

Тема выпуска: Технические науки

| Название статьи | Страницы |
|---|---|
| **РАЗДЕЛ 1. МАШИНОСТРОЕНИЕ И АВТОМАТИЗАЦИЯ ПРОИЗВОДСТВЕННЫХ ПРОЦЕССОВ** | |
| **ОСОБЕННОСТИ ПРОЯВЛЕНИЯ ЗАКОНОМЕРНОСТЕЙ ФИЗИЧЕСКОЙ МЕЗОМЕХАНИКИ ПРИ ТРЕНИИ И ИЗНОСЕ**<br>*Якубов Ф.Я., Ким В.А., Якубов Ч.Ф.* | 5-9 |
| **РАСЧЕТ И ПРОЕКТИРОВАНИЕ ОСНОВНЫХ ПАРАМЕТРОВ ОГРАНИЧИТЕЛЯ ВАРЬИРУЕМОЙ ГРУЗОПОДЪЕМНОСТИ ДЛЯ МОСТОВЫХ И КОЗЛОВЫХ БЕСКОНСОЛЬНЫХ КРАНОВ**<br>*Абдулгазис У.А., Хабрат Н.И., Менасанова С.Э.* | 9-14 |
| **АДАПТИВНОЕ РАЗДЕЛЕНИЕ НА СЛОИ ИСХОДНОЙ 3D МОДЕЛИ ИЗДЕЛИЯ В ТЕХНОЛОГИЯХ БЫСТРОГО ПРОТОТИПИРОВАНИЯ И ИЗГОТОВЛЕНИЯ**<br>*Абдурайимов Л.Н.* | 14-20 |
| **ОСОБЕННОСТИ ПОДГОТОВКИ ДЕТАЛЕЙ К СОПРЯЖЕНИЮ ПО ЭКСПЛУАТАЦИОННОМУ КРИТЕРИЮ**<br>*Богуцкий В.Б., Шрон Л.Б., Мануйленко В.М.* | 20-23 |
| **МОДЕЛИРОВАНИЕ СЪЕМА МЕТАЛЛА ПРИ СУПЕРФИНИШИРОВАНИИ**<br>*Новоселов Ю.К., Дымченко И.А.* | 24-27 |
| **АВТОМАТИЧЕСКАЯ МАШИНА ДЛЯ ЛИТЬЯ ПОД ДАВЛЕНИЕМ ПЛОТНЫХ, ПРОЧНЫХ И ГЕРМЕТИЧНЫХ ОТЛИВОК**<br>*Падерин В.Н., Галух В.И.* | 27-32 |
| **РАЗРАБОТКА МОДЕЛИ ДИАГНОСТИКИ И ПРОГНОЗИРОВАНИЯ ПРОЦЕССА ЧИСТОВОГО ШЛИФОВАНИЯ**<br>*Ягьяев Э.Э.* | 32-37 |
| **НАДЕЖНОСТЬ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ С УЧЕТОМ ЧЕЛОВЕЧЕСКОГО ФАКТОРА**<br>*Якубов Д., Байрамов Р.С.* | 36-40 |
| **РАЗДЕЛ 2. АВТОМОБИЛЬНЫЙ ТРАНСПОРТ** | |
| **РАЗРАБОТКА СИСТЕМЫ КОНТРОЛЯ УСКОРЕНИЙ ТЯГОВО-ТРАНСПОРТНЫХ СРЕДСТВ**<br>*Болдовский В.Н., Клец Д.М.* | 42-44 |

**ВОЗМОЖНОСТИ ПОВЫШЕНИЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ Н-ДИЗЕЛЯ НА ОСНОВЕ АЛЮМОГИДРИДА С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ПЕРГИДРОЛЯ** 45-50
*Подзноев Г.П., Абдулгазис У.А.*

**НОВЫЙ ПОДХОД К ОЦЕНКЕ ТЯГОВОГО БАЛАНСА АВТОМОБИЛЯ (В ПОРЯДКЕ ОБСУЖДЕНИЯ)** 50-54
*Подригало М.А.*

**СТІЙКІСТЬ АВТОМОБІЛЯ ПРИ РІЗНИЦІ ГАЛЬМІВНИХ СИЛ НА ЙОГО БОРТАХ** 54-58
*Подригало М.А., Коробко А.І.*

**ПОДДЕРЖАНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ОХЛАЖДАЮЩИХ СИСТЕМ АВТОТРАКТОРНЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ В УСЛОВИЯХ ЭКСПЛУАТАЦИИ ПУТЕМ СНИЖЕНИЯ КОРРОЗИОННО-НАКИПНОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ ОХЛАЖДАЮЩЕЙ ЖИДКОСТИ (НА ПРИМЕРЕ СТЕПНОГО РЕГИОНА И ДРУГИХ РАЙОНОВ КРЫМА)** 58-66
*Эреджепов М.К.*

**РАЗДЕЛ 3. СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННОЕ МАШИНОСТРОЕНИЕ**

**ОБОСНОВАНИЕ ФОРМЫ ОПОРНО-ПРИКАТЫВАЮЩИХ УСТРОЙСТВ ЗЕРНОВЫХ СЕЯЛОК** 67-68
*Бабицкий Л.Ф., Кувшинов А.А., Тарасенко В.И.*

**ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ ОБОСНОВАНИЕ ПАРАМЕТРОВ ВИБРОУДАРНОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ КУЛЬТИВАТОРНЫХ ЛАП НА ПОЧВУ** 69-70
*Балко В.В., Куклин В.А., Котелевич К.П.*

**ИССЛЕДОВАНИЕ ИЗНОСОСТОЙКОСТИ РЕЖУЩИХ ЭЛЕМЕНТОВ ПОЧВООБРАБАТЫВАЮЩИХ РАБОЧИХ ОРГАНОВ** 70-73
*Москалевич В.Ю.*

# РАЗДЕЛ 1. МАШИНОСТРОЕНИЕ И АВТОМАТИЗАЦИЯ ПРОИЗВОДСТВЕННЫХ ПРОЦЕССОВ

УДК 621.891:620.192.4

**Якубов Ф. Я., Ким В. А., Якубов Ч. Ф.**

## ОСОБЕННОСТИ ПРОЯВЛЕНИЯ ЗАКОНОМЕРНОСТЕЙ ФИЗИЧЕСКОЙ МЕЗОМЕХАНИКИ ПРИ ТРЕНИИ И ИЗНОСЕ

*Щодо процесів зношування при терті, розглядаються закономірності структурних змін в контактних шарах, що призводять до розвитку мезоструктурних утворень, з яких потім формуються продукти зношування.*

***Ключові слова:*** *тертя та зношування, деформаційне укріплення, дисипативні структури, адгезія, мезоструктури, поверхнева енергія.*

*Применительно к процессам изнашивания при трении рассмотрены закономерности структурных изменений в контактных слоях, приводящие к развитию мезоструктурных образований, из которых впоследствии формируются продукты износа.*

***Ключевые слова:*** *трение и изнашивание, деформационное упрочнение, диссипативные структуры, адгезия, мезоструктуры, поверхностная энергия.*

*As applying to processes of wearing out during friction regularities of structural alterations in contact layers are examined that lead to development of mesostructural formations from which products of wearing out are formed in the long run.*

***Key words:*** *friction and wearing, strain hardening, dissipative structures, adhesion, mesostructure, surface energy.*

**Постановка проблемы.** Среди большого числа задач повышения качества поверхностей и надежности деталей машин имеется ряд проблем, которые в научном плане продолжают оставаться злободневными. К ним можно отнести развитие упрочняющих технологий, обеспечивающих тенденцию устойчивого роста режимов эксплуатации машин на фоне возрастающих дефицита и стоимости эффективных легирующих компонентов, необходимых для создания повышенных эксплуатационных свойств конструкционных материалов.

**Анализ литературы.** Все многообразие технологических приемов упрочнения с энергетической точки зрения можно свести к процессу формирования структур с повышенным значением удельной внутренней или свободной энергии.

При поверхностно-пластическом деформировании упрочненные слои представляют структуры с повышенной плотностью дислокаций [1, 2]. Упрочнение при ионной имплантации достигается развитием высокой плотности радиационных дефектов кристаллического строения, преимущественно вакансий, и дополнительным внедрением легирующих элементов с формированием структур, близких к диффузионному типу [3, 4].

При нанесении на поверхность износостойких покрытий создается пленка с переходным слоем, отличающимся от основного материала кристаллографическими, физико-химическими и триботехническими свойствами [5, 6].

Таким образом, каждый тип упрочненной поверхности характеризуется своим структурно-энергетическим градиентным соотношением и толщиной модифицированного слоя.

**Целью статьи** является рассмотрение деформационных процессов при трении материалов с позиций мезомеханики.

**Изложение основного материала.** Основной задачей физической мезомеханики применительно к процессам изнашивания в парах трения является раскрытие закономерностей структурных изменений в поверхностных слоях, приводящих к развитию фрагментированных мезоструктурных образований, из которых впоследствии формируются продукты износа. Последовательность и характер протекания этих процессов инициируется потоком механической энергии контактного взаимодействия, основную форму релаксации которой представляет пластическая деформация.

Поверхность и примыкающий к ней слой имеют большое значение при деформации и разрушении материала, поэтому они выделяются в отдельную структурную систему, которой отводится особая роль в процессах функционирования концентраторов напряжений, релаксации напряжений и диссипации подводимой энергии. При трении и изнашивании роль поверхностных слоев значительно возрастает в

связи с тем, что через них происходит передача механической энергии контактного взаимодействия и локализуются все процессы трибологического характера.

Ювенильная (свежеобразованная) поверхность, по своей сути, представляет макроскопический дефект кристаллического строения, состоящий из атомов с разорванными и неуравновешенными химическими связями, которые в совокупном выражении проявляются в виде поверхностной энергии. Поверхностная энергия в свою очередь влияет на микроструктуру подповерхностного слоя и его микрогеометрию. Поверхность реальных материалов покрыта пленками различной природы, в том числе химическими, оксидными и адсорбированными, понижающими поверхностную энергию. Неровности микро-, мезо- и макромасштабных уровней в совокупности с микролокальными зонами выхода дефектов кристаллического строения формируют на поверхности высокую плотность активных концентраторов напряжений.

Геометрическая и временная дискретность фактической площади контакта определяет характер функционирования источников температурно-силовых возмущений и плотность их распределения в зонах фрикционного взаимодействия. Пластическая деформация материала является формой релаксации напряжений, а тип носителя пластической деформации зависит от пространственно-временных характеристик поля напряжений и соответствует условию максимума плотности диссипативного оттока. В результате, поверхностные слои испытывают различную степень и вид деформации в соответствии с тензором напряжения, который в свою очередь зависит от направления скольжения, уровня силовых и тепловых нагрузок, а также положения области относительно фрикционного контакта.

Процессы схватывания и образования адгезионных и когезионных связей происходят только в тех микролокальных зонах, где развиваются контактные нагрузки, превосходящие прочность граничных слоев.

Динамика развития зон адгезионно-когезионного взаимодействия носит в зависимости от опорной кривой микронеровностей блуждающий характер, а частота образования – стохастический. Образование адгезионных связей происходит за счет нормальных контактных нагрузок, а разрушение – за счет тангенциальных напряжений. Микролокальная зона адгезионного процесса подвергается сжатию в период образования адгезионной связи и сдвиговой деформации при их разрушении. Следовательно, в пластической деформации трибопроцесса не может быть компонентов растяжения, перпендикулярных плоскости трения, и это ставит под сомнение многие модели механического истирания, в которых активность производства продуктов износа связывают с отрывом частиц и пределом прочности материала на растяжение [7].

Высокая концентрация пластической деформации в поверхностных слоях приводит к развитию полей напряжений, деформаций и скоростей смещений со всеми высокими градиентными характеристиками. Это в свою очередь вызывает расслаивание материала на мезомасштабном уровне по плоскостям разрыва скоростей сдвига и развитие границ раздела параллельных плоскости трения. Каждый слой первоначально состоит из дендритов, ориентированных параллельно плоскости скольжения, а их степень упорядоченности носит градиентный характер, вектор которого направлен к плоскости скольжения. Образование таких границ представляет одну из форм организации мезоструктуры трибологического характера.

Основными носителями деформации контактных поверхностей при трении (наряду с традиционными дислокациями и зернограничными сдвигами) являются смещения между слоями, которые в свою очередь значительно превосходят параметр кристаллической решетки и носят не дислокационный характер.

По мере дальнейшего развития трибологического процесса происходит разбивка дендритной структуры и ее трансформация в ультрадисперсную поликристаллическую. В верхних слоях, примыкающих к поверхности трения, процесс разбивки протекает более активно, а формирующиеся при этом ультрадисперсные зерна принимают относительно равноосную форму.

Высокая диффузионная и химическая активность ультрадисперсной структуры приводит к сложному взаимодействию ее с окружающей средой; в результате формируется структура, сильно отличающаяся по химическому составу от исходной. Слой, состоящий из ультрадисперсной структуры, имеет относительно однородную эпюру распределения химического потенциала по толщине и резкую границу раздела с подложкой. С ее появлением процесс приработки можно считать завершенным, так как дальнейшее развитие фрикционного процесса приводит к образованию элементарных носителей разрушения материала.

Границы раздела ультрадисперсной структуры отличаются высокой развитостью. Учитывая, что любые границы раздела имеют более высокую подвижность по сравнению с другими структурными составляющими, в них происхо-

дит локализация носителей пластической деформации и источников диссипации мезомасштабного уровня. Это означает, что с повышением развитости границ раздела зерен и фаз износостойкость материала должна возрастать. С другой стороны, границы раздела состоят из структур с напряженными или неуравновешенными атомарными связями, которые сами по себе являются концентраторами напряжений и способствуют образованию носителей разрушения микро- и мезомасштабного уровня. При выходе носителей разрушения на макроуровень происходит формирование частиц износа, вскрытие и обновление поверхностей трения.

Установившееся изнашивание можно трактовать как распределенный во времени процесс бифуркации, состоящий из последовательного чередования разрушения, приводящего к обновлению поверхности трения, и вовлечения вновь вскрытых ювенильных поверхностей в диссипативный режим. Интенсивность изнашивания определяется соотношением этих двух процессов.

Разрыв адгезионных связей за счет касательных напряжений, параллельных вектору скорости скольжения, способствует образованию поверхностных микротрещин впереди и позади зоны схватывания. Микротрещины, образованные позади зоны схватывания, ориентируются преимущественно перпендикулярно скорости скольжения, так как формируются за счет растяжения слоев верхних уровней. Микротрещины, возникающие впереди зоны схватывания, ориентируются преимущественно под углом $\pi/4$ к вектору скорости скольжения, так как причиной их появления является сжатие поверхностных слоев.

Расположение микротрещин носит упорядоченный характер, при этом они чередуются с полосами углубления, аналогичными шейке локализованной деформации при растяжении. Микротрещины состоят из коротких «берегов», а локализованные полосы растягивающих деформаций пронизывают всю «дорожку» скольжения.

Поля сжимающих и растягивающих напряжений на поверхности трения носят периодический характер, образуя на поверхности волновой рельеф типа «шахматной доски», поэтому распределенные на поверхности микротрещины образуют сетчатый рисунок из наложенных друг на друга ортогональных и наклонных (под углом $\pi/4$) относительно вектора скорости скольжения рисок, напоминающий протектор автомобильной шины. Если граница расслоения близка к поверхности трения, то могут образовываться микротрещины под поверхностью трения за счет «наползания» одного слоя на другой, в этом случае велика вероятность образования микротрещин или пор в глубине от плоскости трения.

Поверхность трения, покрытая микротрещинами, представляет самостоятельную диссипативную структуру трибологического характера, которая может играть активную роль в рассеивании механической энергии. Поверхностное разрушение при трении (изнашивании) представляет форму диссипации энергии контактного взаимодействия, которому предшествует процесс пластической деформации поверхностных структур и самосогласованное образование и развитие концентраторов напряжений микро-, мезо- и макромасштабных уровней. Изнашивание является комплексным процессом, отличающимся многообразием механизмов разрушения, комбинация которых и их активность зависят от режимов контактного взаимодействия.

Процесс механического истирания является завершающей стадией большинства механизмов изнашивания, а образование продуктов износа происходит главным образом за счет ротационных смещений материала в зонах разрыва скоростей скольжения.

Рассмотрим этот процесс в идеализированном виде при трении без смазочного материала. Первоначально пластическая деформация локализуется в области, примыкающей к поверхности трения. Затем пластическое течение интенсивно развивается в приповерхностном слое, вызывая мезофрагментацию материала и развитие турбулентного слоя. Образование элементов турбулентного слоя представляет завершающую стадию единого процесса мезофрагментации и проходит несколько ступеней своего развития.

В зонах поверхностных концентраторов напряжений образуются микротрещины, в который стекает поток дефектов кристаллического строения, приводящий к ее расклиниванию и росту. Микротрещины повышают дискретность контакта, а при наличии защитного покрытия – его «островковость». Дискретность контакта усиливается за счет пластического смещения и наползания друг на друга отдельных «островковых» фрагментов.

Образование микротрещин в зоне адгезионного контакта и высокая степень фрагментации структуры поверхностного слоя приводят материал в этой локализованной области в сложнонапряженное состояние, в котором наиболее активно развиваются поворотные моды тензора деформации. Функционирование поворотных мод можно рассматривать как очередную смену носителя пластической деформации, повышающую диссипативную активность поверхностных вторичных структур и снижающих фрикцион-

ную напряженность контакта.

Развитие поворотных мод происходит за счет моментов от тангенциальных сил схватывания, ориентированных параллельно направлению скольжения, и градиента напряжения внутреннего трения в поверхностных слоях. Этот процесс схематично представлен на рис. 1, где отмечены зоны схватывания, направление скольжения ($V_{ск}$) и направление поворотных мод.

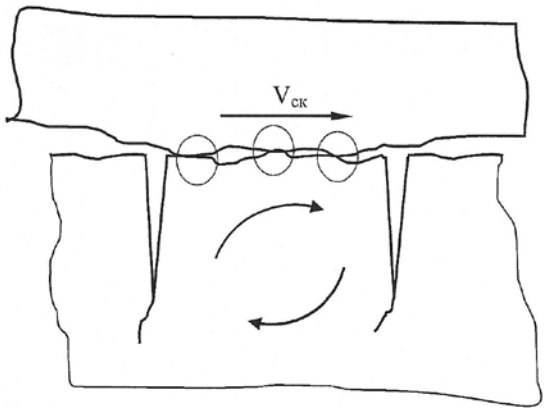



**Рис. 1 Схема образования турбулентного фрагмента (валика).**

Деформационный процесс инициирует диффузионный поток, направленный параллельно потоку дефектов кристаллического строения. В результате происходит ощутимое снижение концентрации легирующих компонентов на некоторой глубине от плоскости трения и разупрочнение этого слоя. Наличие такого слоя активизирует процесс турбулизации. В результате формируется элементарный носитель турбулентного слоя – «валик», совершающий ротационно-перекатывающее движение. Если уровень контактных нагрузок ниже предела прочности на сжатие, то завершением этого процесса является формирование частиц износа игольчатой формы.

В случае высоких контактных нагрузок, превышающих предел прочности на сжатие, образующиеся фрагменты износа претерпевают многократную пластическую деформацию, дополнительную фрагментацию и активное вторичное взаимодействие с поверхностью трения. Частицы износа могут размазываться по поверхности трения, образуя вторичную структуру слоисто-композиционной архитектоники. Частицы износа в этом случае могут принимать различные размеры: от чешуйчатой до игольчатой формы, а их структура и химический состав будут сильно отличаться от исходного материала. После разрушения и уноса фрагментированного слоя процесс повторяется на вновь образованном приповерхностном уровне.

Процесс установившегося изнашивания заключается в стабильном функционировании всех механизмов структурообразования, фрагментацию, развитие турбулентного слоя и образование частиц износа, которые в совокупности можно рассматривать как последовательность чередования гомеостазов трибологической системы.

Деформационное упрочнение при трении формирует в поверхностных слоях положительный градиент механических свойств за счет развития остаточных сжимающих внутренних напряжений, которые стабилизируют рост микротрещин и повышают их устойчивость. Поток диффузантов из глубинных слоев приводит к снижению потока дефектов кристаллического строения, что также способствует стабилизации микротрещин.

Наличие на поверхности защитных покрытий приводит к отстаиванию развития последовательных гомеостазов, и это проявляется на кинетике кривой накопления износа.

Рассмотрим этот процесс более подробно. Большинство технологий нанесения защитных покрытий образует на поверхности композиционную слоистую структуру с положительным градиентом прочностных свойств, характер которого определяется эпюрой распределения химического потенциала [8].

Многие технологии нанесения защитных и износостойких покрытий формируют самый верхний слой с зачатками «островковости», которая проявляется в разнотолщинности и локальной неоднородности. Явная «островковость» характерна для таких технологий, как электроискровое легирование, газотермическое напыление и др.

Даже при первоначальном сплошном покрытии за счет динамических процессов контактного взаимодействия в первые минуты происходит растрескивание и отслаивание наиболее слабых мест, и на поверхности формируется «островковость». Наличие системы микротрещин между «островками» играет роль демпфера и активизирует процесс рассеивания энергии контактного взаимодействия за счет упругого колебания остовов «островков». Диссипация энергии в этом случае происходит по аналогии с рассеиванием энергии на протекторах автомобильных шин (рис. 2).

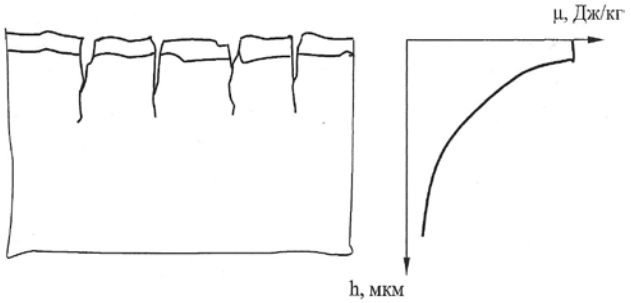


**Рис. 2. Архитектура поверхностного слоя с защитным покрытием.**

Трибологические процессы производят активное тепловыделение, так как большая часть энергии контактного взаимодействия выделяется в виде тепла и незначительная доля затрачивается на повышение химического потенциала поверхностных структур.

Основной отвод тепла из зоны контактного взаимодействия происходит за счет теплопроводности в зоны, примыкающие к контактной поверхности, в результате чего формируется градиент температуры, направленный к поверхности.

**Выводы.**

1. При наличии на поверхности трения защитного покрытия архитектоника поверхностного слоя отличается более высокими градиентными соотношениями в переходной области. Развитие микротрещин в этом случае сдерживается положительным градиентом химического потенциала и сжимающими напряжениями в поверхностных слоях. Поток легирующих элементов и примесей, направленный противоположно потоку дефектов кристаллического строения, стабилизирует пластическую зону у вершин микротрещин, повышая в целом трещиностойкость материала.

2. Высокая степень стехиометрии покрытия минимизирует процессы схватывания и образования адгезионных связей, а это в свою очередь замедляет развитие турбулентного процесса.

3. Покрытия, получаемые методом газотерческого напыления, механическим и элекроконтактным плакированием, характеризуются слоистым строением, при этом границы между слоями можно рассматривать как границы раздела фаз. При триботехническом нагружении таких структур границы между слоями представляют сформированные поверхности сдвига, и от их диссипативных свойств во многом будет зависеть износостойкость материала.

ЛИТЕРАТУРА


1. Белый А. В. Поверхностная упрочняющая обработка с применением концентрированных потоков энергии / А. В. Белый, Е. М. Макушок, И. Л. Соболь. – М. : Наука и техника, 1990. – 78 с.
2. Гордиенко Л. К. Субструктурное упрочнение металлов и сплавов / Л. К. Гордиенко – М. : Наука, 1973. – 224 с.
3. Быковский Ю. А. Ионная лазерная имплантация металлических материалов / Ю. А. Быковский, В. Н. Неволин, Ю. В. Фоминский. – М. : Энергоиздат, 1991. – 240 с.
4. Верещака А. С. Режущие инструменты с износостойкими покрытиями / А. С. Верещака, И. П. Третьяков. – М. : Машиностроение, 1986. – 192 с.
5. Барвинок В. А. Управление напряженным состоянием и свойства плазменных покрытий / В. А. Барвинок. – М. : Машиностроение, 1990. – 384 с.
6. Шатинский В. Ф. Защитные покрытия / В. Ф. Шатинский, А. И. Нестеренко. – К. : Наукова Думка, 1988. – 272 с.
7. Панин В. Е. Износ в парах трения как задача физической мезомеханики / В. Е. Панин, А. В. Колубаев, А. И. Слосман, С. Ю. Тарасов, С. В. Панин, Ю. П. Шаркеев // Физическая мезомеханика. – 2000. – Т. 3. – № 1. – С. 67–74.
8. Бойко В. С. Обратимая пластичность кристаллов / В. С. Бойко, Р. И. Гарбер, А. М. Косевич. – М. : Наука, 1991. – 280 с.

УДК 621.86/87(075.8)

**Абдулгазис У. А., Хабрат Н. И., Менасанова С. Э.**

# РАСЧЕТ И ПРОЕКТИРОВАНИЕ ОСНОВНЫХ ПАРАМЕТРОВ ОГРАНИЧИТЕЛЯ ВАРЬИРУЕМОЙ ГРУЗОПОДЪЕМНОСТИ ДЛЯ МОСТОВЫХ И КОЗЛОВЫХ БЕСКОНСОЛЬНЫХ КРАНОВ

*Приведені основи розрахунку і проектування розмежувача змінної вантажопідйомності для мостових і безконсольних козлових кранів, рами металоконструкцій яких виготовлені з постійним моментом опору в перетинах за їх довжиною.*

***Ключові слова:*** *вантажопідйомні машини, вантажопідйомність, розмежувач вантажопідйомності.*

*Приведены основы расчета и проектирования ограничителя варьируемой грузоподъемности для мостовых и бесконсольных козловых кранов, рамы металлоконструкций которых выполнены с постоянным моментом сопротивления в сечениях по их длине.*

***Ключевые слова:*** *грузоподъемные машины, грузоподъемность, ограничитель грузоподъемности.*

*The fundamentals of calculation and design of the variable hoisting capacity limiter for bridge (traveling) and cantileverless gantry cranes made of metal constructions with constant moment of resistance in lengthwise cross-sections are presented.*

***Key words:*** *cranes, lifting machines, hoisting capacity load limiter, hoisting weight limiter.*

**Постановка проблемы.** Для обеспечения безопасной эксплуатации мостовых и козловых кранов особое значение имеют расчет и проектирование ограничителя грузоподъемности.

**Анализ литературы.** В различных отраслях производства для механизации и автоматизации погрузочно-разгрузочных работ широкое применение получили мостовые и козловые краны, в которых для расширения поля обслуживания используются грузовые тележки, перемещающиеся по металлоконструкции крана [1, 2].

В большинстве случаев на этих тележках устанавливаются и механизмы подъема грузов. Аналогичные технические решения имеются и на некоторых стреловых кранах, в которых грузовая стрела в этом случае устанавливается горизонтально. Нормативными документами [3] для обеспечения безопасной эксплуатации механизма подъема предусматривается установка ограничителей грузоподъемности, которыми ограничивается допустимая величина силы тяжести груза при нахождении грузовой тележки с грузом в наиболее опасном месте.

При этом отметим, что металлоконструкции кранов изготавливаются из проката и в поперечном сечении по длине имеют в большинстве случаев постоянные размеры [1, 2].

Из этого следует, что при перемещении грузовой тележки в менее нагруженные места на раме металлоконструкции крана представляется возможность безопасно повысить грузоподъемность перечисленных выше кранов. Учитывая эту особенность, нами разработана принципиальная схема ограничителя варьируемой грузоподъемности с автоматическим учетом положения грузовой тележки с предельно допустимым грузом при соответствующих положениях по длине рамы на металлоконструкциях кранов [4] в связи с отсутствием технических решений [5], решающих подобные задачи (рис. 1).

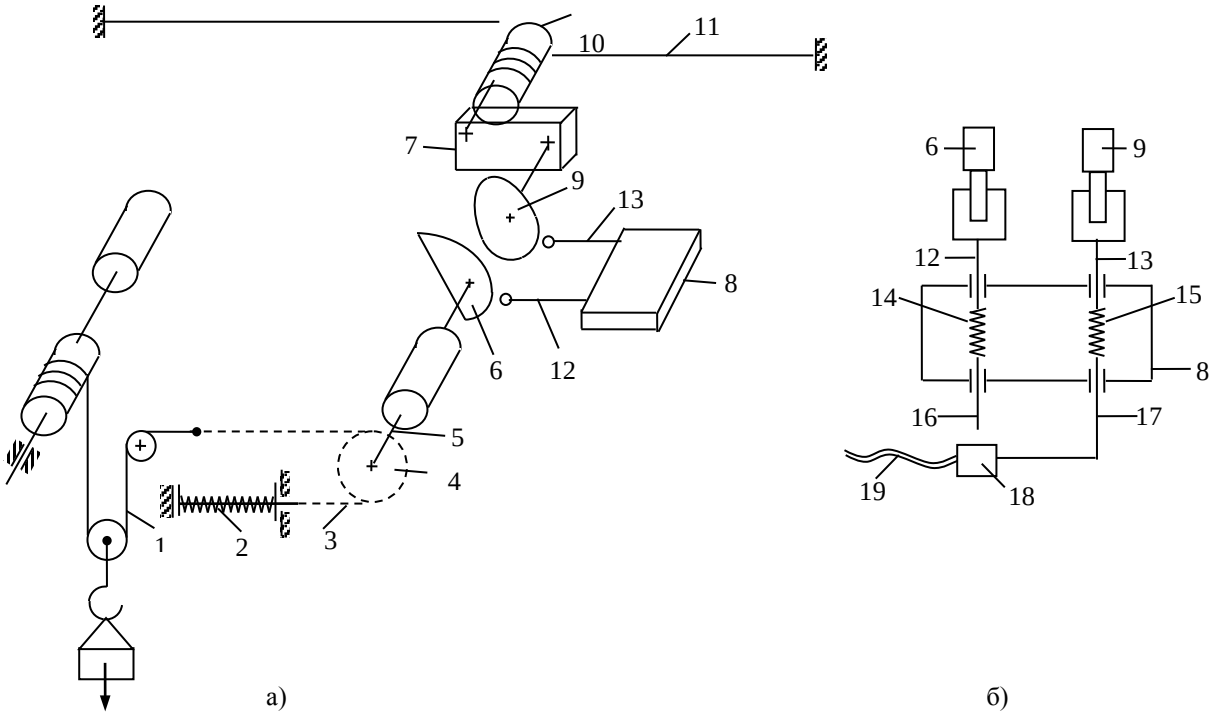



**Рис. 1. Кинематическая схема ограничителя варьируемой грузоподъемности крана.**

Устройство (рис. 1а) содержит динамометрическую пружину сжатия 2, кинематически соединенную с грузовой ветвью 1 полиспаста посредством цепи 3, входящей в зацепление со звездочкой 4 на валу 5. На этом же валу устанавливается грузовой кулачок 6, профиль которого выполняется в виде кривой спирали Архимеда. Согласно этому грузовому кулачку 6 на тихоходном валу редуктора 7 устанавливается кулачок положения 9 грузовой тележки на металлоконструкции крана. На быстроходном валу этого же редуктора 7 устанавливается барабан 10 с навитым на него гибким органом 11 (стальным канатом). Гибкий орган концами закрепляется на концах металлоконструкции, по которой перемещается грузовая тележка, а в средней части его длины – жестко на барабане.

Кулачок положения 9 выполняется выпуклой формой и имеет минимальный радиус кривизны профиля при положении грузовой тележки на металлоконструкции крана с предельно допустимой номинальной грузоподъемностью. Например, для мостового и козлового крана – это середина пролета.

Кулачки грузовой 6 и положения 9 кинематически соединены соответственно с толкателя-

ми 12 и 13 контактора 8. Толкатели 12 и 13 поджимаются к соответствующим кулачкам посредством пружин 14 и 15 (рис. 1б). Толкатель положения грузовой тележки 13 выполнен Г-образной конструкцией, на консоли которого закреплен конечный выключатель 18 с проводной связью 19. На толкателях 12 и 13 устанавливаются ролики, которыми они перекатываются по кулачкам 6 и 9, поджимаемым пружинами 14 и 15.

Работает рассмотренный выше ограничитель варьируемой грузоподъемности следующим образом. При подвешивании груза к крюковой подвеске полиспаста усилие передается через грузовой канат и цепь на динамометрическую пружину (которая, деформируясь, создает движение цепи), кинематически связанную со звездочкой, и грузовому кулачку, а последний – взаимодействующему с ним толкателю, поджимаемому пружиной к рабочей поверхности грузового кулачка.

Кулачок же положения фиксирует своим углом поворота положение грузовой тележки с грузом на металлоконструкции крана, передавая механически эту информацию на соответствующий ему толкатель через ролик, поджимаемый к его рабочей поверхности пружиной.

В случае, когда сила тяжести подвешенного груза достигает предельно допустимого значения, толкатель, взаимодействующий с грузовым кулачком, воздействует на выключатель, расположенный на толкателе, фиксирующем положение грузовой тележки на раме крана, подавая сигнал на отключение привода на подъем – сигнал запрета.

Возможен и другой случай. Груз подвешен к крюковой тележке на периферии металлоконструкции крана и перемещается грузовой тележкой к центру пролета крана. При этом тележка, достигнув соответствующего положения на металлоконструкции рамы крана с предельно допустимой грузоподъемностью, автоматически останавливается, так как замыкаются контакты конечного выключателя толкателя, кинематически связанные с грузовым кулачком.

**Целью работы** является разработка последовательности расчета и проектирования при определении основных параметров ограничителя варьируемой грузоподъемности для грузоподъемных кранов рассмотренной выше конструкции.

**Изложение основного материала.** Для определения основных параметров и размеров рассмотренной выше конструкции ограничителя варьируемой грузоподъемности необходимо иметь следующие исходные данные: суммарную номинальную силу тяжести поднимаемого краном груза и грузовой тележки $Q$, распределенную силу тяжести металлоконструкции рамы крана $q$, пролет крана $L$ и рабочую длину участка пробега грузовой тележки по металлоконструкции крана $l$.

Последовательность расчета:

1. *Определение допустимой силы тяжести.* По известной зависимости [3] определяется допустимое суммарное усилие $Q_i$ грузовой тележки с грузом в крайних рабочих положениях грузовой тележки на металлоконструкции крана с рабочим пролетом $l$ и промежуточные, задавшись определенным шагом $x$ (см. ниже п. 11) (рис. 2):

$$Q_i = \left[0{,}25QL + 0{,}125q\left(L - 2x\right)^2\right] \cdot \left[x\left(1 - x/L\right)\right]^{-1} \qquad (1)$$

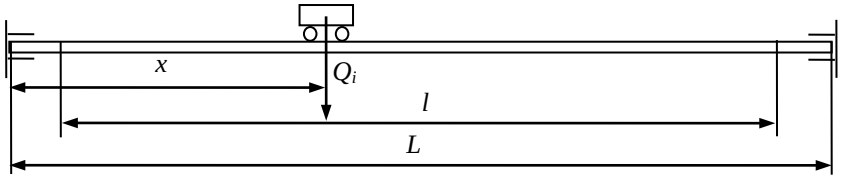



**Рис. 2. Схема нагружения рамы.**

Суммарное рабочее усилие $Q_{pi}$ принимается исходя из производственных требований, и оно не должно превышать допустимого $Q_i$ в любом из рабочих положений грузовой тележки на металлоконструкции мостового крана.

Предельно допустимая суммарная сила тяжести поднимаемого груза и грузовой тележки $Q_{max}$ имеет место при крайних положениях грузовой тележки с грузом при $x = 0{,}5(L - l)$ и по зависимости (1) составляет:

$$Q_{c\max} = \frac{QL^2 + 0{,}5ql^2L}{L^2 - l^2}. \qquad (2)$$

При этом максимальная сила тяжести поднимаемого груза составит:

$$Q_{\max} = Q_{c\max} - Q_T, \qquad (3)$$

где $Q_T$ – сила тяжести тележки.

2. *Выбор схемы полиспаста*. Наиболее рациональной схемой следует считать кратный полиспаст с четной кратностью вследствие того, что неприводная ветвь гибкого органа закрепляется на грузовой тележке [1], усилие в которой

используется в качестве информации о величине силы тяжести поднимаемого груза.

3. *Определение усилия в неприводной ветви полиспаста*. Максимальное усилие в неприводной ветви полиспаста при подъеме груза определяется по зависимости [1]:

$$F_{\max} = \frac{Q_{\max}\eta_{\text{п}}}{m}. \qquad (4)$$

где $Q_{\max}$ – максимальная сила тяжести груза;
$m$ и $\eta_{\text{п}}$ – соответственно, кратность полиспаста и его коэффициент полезного действия.

По аналогии, усилие в приводной ветви полиспаста $F_{\min}$ при подъеме номинального груза $Q_{\text{н}}$, находящегося посередине пролета металлоконструкции крана, имеет вид:

$$F_{\min} = \frac{Q_{\text{н}}\eta_{\text{п}}}{m}, \qquad (5)$$

и усилие предварительного сжатия пружины составляет:

$$F_1 = 0{,}8F_{\min}, \qquad (6)$$

4. *Выбор динамометрической пружины*. В качестве динамометрической пружины наиболее рационально принимать винтовые пружины сжатия 1-го класса II-го разряда по ГОСТ 13767-86 и ГОСТ 13768-86. При этом максимальное усилие при сжатии пружины $F_3$ принимается с 20% запасом и должно составлять:

$$F_3 \geq \frac{F_{\max}}{0{,}8} \qquad (7)$$

с жесткостью одного витка $z_1$ по тому же стандарту.

5. *Определение параметров передаточного механизма на грузовой кулачок*. Передаточный механизм на грузовой кулачок может быть выполнен в двух вариантах: в виде одной звездочки или в комбинации звездочки с редуктором.

5.1. *Выбор цепи к динамометрической пружине*. Рационально принимать цепь втулочно-роликовую или же втулочную с минимальным шагом, многорядную с тем, чтобы звездочка была малых размеров, а угол поворота был бы значительным при сравнительно небольшой деформации пружины. Цепь выбирают по разрывному усилию $F_{\text{раз}}$, задавшись коэффициентом запаса прочности $n$ по рекомендациям [5]:

$$F_{\text{раз}} \geq F_{\max} n. \qquad (8)$$

По таблицам ГОСТ 13568-75 принимается цепь с шагом $p$, удовлетворяющая условию (8).

5.2. *Выбор угла поворота звездочки.* Полный угол поворота звездочки принимается равным углу поворота грузового кулачка из конструктивных соображений: $\alpha = 240$–$260°$.

5.3. *Определение параметров пружины.* Деформация динамометрической пружины $\lambda$ определяется по зависимости:

$$\lambda = \frac{\alpha z p}{2\pi}, \qquad (9)$$

где $\alpha$ – задаваемый угол поворота грузового кулачка по п. 5.2 в радианах;
$z$ – принятое число зубьев звездочки с шагом $p$.

Предпочтительно принимать число зубьев звездочки $z$ минимальным, например $z = 7$ [6].

Разность в усилиях сжатия пружины $\Delta F$ при ее наибольшей деформации и предварительном сжатии:

$$\Delta F = F_{\max} - F_1. \qquad (10)$$

Требуемое число витков $n_{\text{в}}$ динамометрической пружины определяется по зависимости:

$$n_{\text{в}} = \frac{\lambda z_1}{\Delta F}, \qquad (11)$$

где $z_1$ – жесткость одного витка пружины.

При этом по п. 4 жесткость динамометрической пружины $z_{\text{п}}$ составит $z_{\text{п}} = z_1/n_{\text{в}}$.

6. *Построение профиля грузового кулачка*. В диапазоне изменения усилий в пружине от $F_1$ до $F_{\min}$ грузовой кулачок выполняется по дуге окружности с радиусом $R_0$ на угле $\alpha_0$. Этой поверхностью кулачка автоматически обеспечивается номинальная грузоподъемность крана.

Радиус окружности $R_0$ кулачка принимается конструктивно, а угол дуги окружности $\alpha_0$ рассчитывается по зависимости:

$$\alpha_0 = \frac{F_{\min} - F_1}{z_{\text{п}} R_0}. \qquad (12)$$

На оставшейся рабочей части угла $\alpha_{\text{р}}$ грузового кулачка $\alpha_{\text{р}} = \alpha - \alpha_0$ его рабочая поверхность выполняется по кривой спирали Архимеда. При этом максимальный радиус $R_{\max}$ рекомендуется принимать $R_{\max} = 2R_0$.

Текущие величины радиуса $R_i$ грузового кулачка в полярной системе координат определяются по зависимости:

$$R_i = \frac{(R_{\max} - R_0)\alpha_{\text{р}i}}{\alpha_{\text{р}}} + R_0 \qquad (13)$$

На рис. 3 представлен профиль грузового кулачка. Для построения полного рабочего профиля грузового кулачка выбирается его центр вращения $O$, через который проводится вертикаль $a$–$a$. Радиусом $R_0$ прочерчивается дуга окружности, на которой отмечается угол $\alpha_0$ и в его продолжение дополнительный угол $\alpha_{0\text{д}} = 10°$. Затем от вертикали $a$–$a$ откладывается угол $\alpha_{\text{р}}$, который делится лучами прямых на равные углы, например, с шагом $\alpha_{\text{рд}} = 10°$.

Координата $S_i$ положения оси ролика грузового толкателя при текущих координатах $\alpha_{\text{р}i}$ определяется:

$$S_i = R_i + R_{\text{р}}, \qquad (14)$$

где $R_{\text{р}}$ – радиус ролика грузового толкателя.

На лучах с координатами $S_i$ проводятся

окружности радиусом $R_р$.

Используя принцип обращения движения [2], вычерчивается вписанная огибающая кривая рабочего профиля грузового кулачка, которая плавно соединяется по концам с дугами окружностей с радиусами $R_0$ и $R_{max}$.

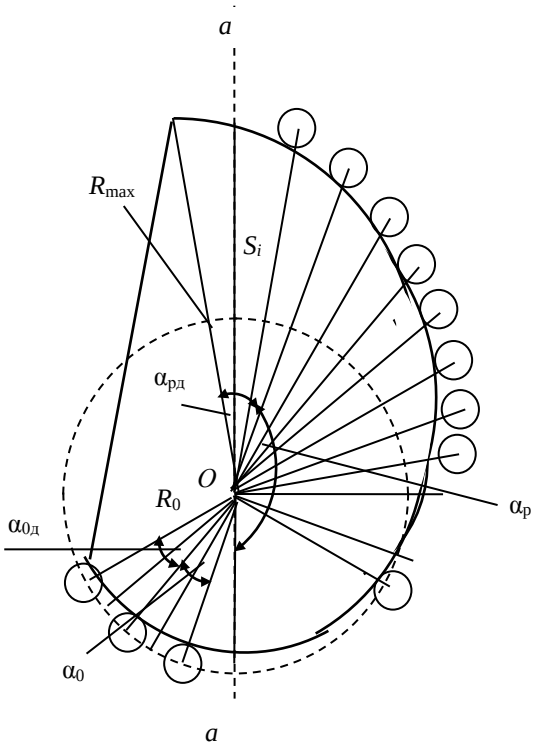



**Рис. 3. Построение профиля грузового кулачка.**

Профиль кулачка с радиусом окружности $R_{max}$ выполняется на дуге окружности $\alpha_{рд}$ = 10–15° и затем концы дуг с радиусами $R_0$ и $R_{max}$ соединяются прямой линией.

7. *Выбор гибкого органа привода кулачка положения грузовой тележки на металлоконструкции рамы мостового крана.* В качестве гибкого органа предпочтительно принимать стальной канат диаметром $d_k$ = 4–6 мм, закрепленный по концам металлоконструкции рамы посредством регулировочных винтов длины.

8. *Расчет диаметра барабана привода кулачка положения грузовой тележки.* Расчетный диаметр барабана $D$ принимается как

$$D = d_k k_d, \qquad (15)$$

где $k_d$ – коэффициент, учитывающий группу режима работы и тип привода; нормативными документами устанавливают $k_d$ = 22,4, 25 и 28, соответственно, при группах режима работы 4М, 5М и 6М [6].

9. *Определение длины гибкого органа.* Общая длина гибкого органа $L_0$ определяется зависимостью:

$$L_0 = 2(l + L_к + L_б), \qquad (16)$$

где $l$ – общая длина перемещения грузовой тележки по раме крана;

$L_к$ – расстояние от оси барабана до места закрепления гибкого органа на раме с учетом длины каната на его закрепление;

$L_б$ – длина запасных витков на барабане от места их закрепления; принимается равной 1,5–2 витка.

10. *Выбор передаточного числа редуктора привода кулачка положения грузовой тележки.* Передаточное число редуктора принимается таким, чтобы угол поворота кулачка положения составлял 170º при перемещении грузовой тележки от середины рамы к каждому из ее крайних положений, а полный угол поворота кулачка положения при перемещении грузовой тележки из одного крайнего положения в другое составлял 340º или 0,944 оборота выходного (тихоходного) вала редуктора.

В этом случае передаточное число $u$ редуктора определяется по зависимости:

$$u = \frac{l}{0{,}944\pi D} \qquad (17)$$

11. *Построение профиля кулачка положения грузовой тележки на раме крана*. Считая, что построение профиля кулачка положения будет производиться в полярной системе координат через каждые 10°, определяется величина шага $L_р$ перемещения грузовой тележки по раме мостового крана:

$$L_р = \frac{10 \cdot l}{340} = \frac{l}{34}. \qquad (18)$$

Используя зависимость (1), определяем величину наибольшей допустимой нагрузки $Q_{max}$ в крайних рабочих положениях грузовой тележки на раме мостового крана.

При $x = \frac{L-l}{2}$ получим:

$$Q_{max} = \frac{Q_c L^2 + 0{,}5ql^2 L}{L^2 - l^2}. \qquad (19)$$

Пользуясь той же зависимостью (1), определяются текущие значения допустимой величины нагрузки на раму мостового крана от ее крайнего положения к середине пролета с шагом $l_р$, соответствующим текущим угловым шагам поворота кулачка положения грузовой тележки равным 10º при

$$x_i = 0{,}5(L-l) + \frac{l \cdot n_i}{34} = 0{,}5\left[L - l\left(1 - \frac{n_i}{17}\right)\right], \qquad (20)$$

$$Q_{cx} = \frac{Q_c L^2 + 0{,}5qL\left[l\left(1 - \frac{n_i}{17}\right)\right]^2}{L^2 - l^2\left(1 - \frac{n_i}{17}\right)^2}, \qquad (21)$$

где $n_i$ – число, выражающее номер положения

грузовой тележки на раме мостового крана, соответствующее номеру на кулачке положения грузовой тележки при его построении, $n_i$ = 0, 1, 2, ... 17.

Вторая половина кулачка является зеркальным отображением первой его половины.

Мгновенный радиус $R_0$ кулачка положения грузовой тележки в полярных координатах при номинальной грузоподъемности принимается равным минимальному радиусу $R_0$ грузового кулачка при нахождении грузовой тележки посередине пролета рамы крана, что соответствует 17-му положению на кулачке положения.

Для грузового кулачка ранее нами принят максимальный радиус кулачка в полярных координатах $R_{\max} = 2R_0$, а это значит, что и для кулачка положения грузовой тележки в крайнем положении следует также принять $R_{\max} = 2R_0$.

При построении профиля кулачка положения в его промежуточных положениях воспользуемся зависимостью:

$$S_i = R_0 + \Delta R_i + R_k, \qquad (22)$$

где $S_i$ – текущая полярная координата центра ролика толкателя положения грузовой тележки контактора;

$R_k$ – радиус ролика толкателя положения грузовой тележки в контакторе;

$\Delta R_i$ – текущая величина изменения радиуса кулачка положения грузовой тележки, определяемая зависимостью:

$$\Delta R_i = R_0\left(1+\frac{Q_{cx}-Q_c}{Q_{\max}-Q_c}\right) = R_0\left(1+\frac{L+0{,}5ql^2\left(1-n_i/17\right)/Q_c-1/L}{L+0{,}5ql^2/Q_c-1/L}\cdot\frac{L^2-l^2}{L^2-l^2\left(1-n_i/17\right)^2}\right) \qquad (23)$$

Определив по формуле (22) текущие значения параметра $S_i$, построим рабочий профиль кулачка положения (рис. 4): выберем центр оси вращения кулачка $O$, построим окружность радиуса $R_0$, через центр вращения проведем вертикальную линию и из него же проводим лучи через каждые 10º, пронумеруем лучи от нуля до 17. На лучах от центра $O$ откладываются соответствующие расстояния $S_i$, на концах которых вычерчиваются радиусы $R_k$ ролика толкателя положения грузовой тележки.

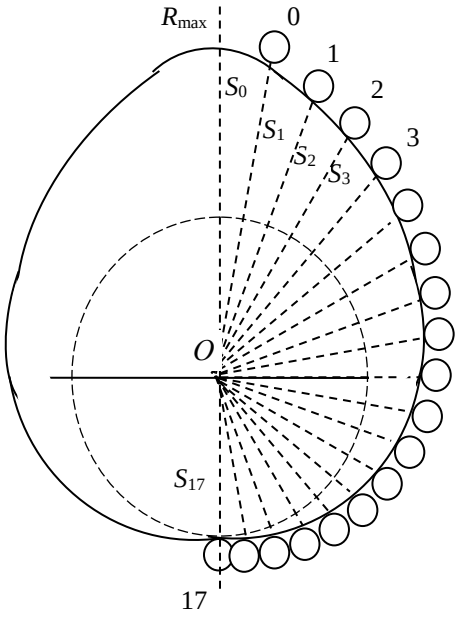



**Рис. 4. Построение рабочего профиля кулачка положения грузовой тележки.**

Используя принцип обращения движения [2], описываем огибающую кривую кулачка положения, которая и представляет рабочий профиль этого кулачка.

Вторая половина кулачка положения, как уже отмечалось, представляет зеркальное отображение вычерченного профиля кулачка положения.

**Вывод.** Разработанные методы расчета и проектирования позволяют определить основные параметры варьируемого ограничителя грузоподъемности для грузоподъемных машин, металлоконструкции которых выполнены в сечении с постоянным моментом сопротивления и опирающиеся концами на опоры.

ЛИТЕРАТУРА


1. Александров М. П. Грузоподъемные машины / М. П. Александров, Л. Н. Колобов, Н. А. Лобов и др. – М. : Машиностроение, 1986. – 400 с.
2. Левитский Н. И. Теория механизмов и машин / Н. И. Левитский. – М. : Наука; Главная редакция физико-математической литературы, 1979. – 576 с.
3. Морозов А. Д. Изыскание резервов повышения несущей способности мостовых кранов / А. Д. Морозов, Н. И. Хабрат, С. Э. Менасанова // Сборник научных трудов НАПКС. Выпуск 26. Строительство и техногенная безопасность. – Симферополь, 2008. – С. 50–53.
4. Пат. № 33054 Украина, МПК B 66 C 17/10. Мостовой кран / Н. И. Хабрат, С. Э. Менасанова. – № 200801325 ; заявл. 04.02.08 ; опубл. 10.06.08, Бюл. № 11. – 3 с.
5. Правила устройства и безопасной эксплуатации грузоподъемных кранов. – Харьков : Форт, 2002. – 416 с.
6. Проектирование механических передач / [С. А. Чернавский, Г. М. Изкович, В. А. Киселев и др.]. – М. : Машиностроение, 1976. – 608 с.
7. Справочник по кранам : в 2 т. / под ред. М. М. Гохберга. – Л. : Машиностроение, 1988. – Т. 2. – 559 с.
8. Федосеев В. Н. Приборы и устройства безопасности грузоподъемных машин : справочник / В. Н. Федосеев. – М. : Машиностроение, 1990. – 320 с.

9. Хабрат Н. И. Повышение эффективности использования грузоподъемных механизмов / Н. И. Хабрат, С. Э. Менасанова, С. С. Аширов // Ученые записки Крымского инженерно-педагогического университета. Выпуск 16. Технические науки. – Симферополь: НИЦ КИПУ, 2008. – С. 119–122.

УДК 621.7

**Абдурайимов Л. Н.**

# АДАПТИВНОЕ РАЗДЕЛЕНИЕ НА СЛОИ ИСХОДНОЙ 3D МОДЕЛИ ИЗДЕЛИЯ В ТЕХНОЛОГИЯХ БЫСТРОГО ПРОТОТИПИРОВАНИЯ И ИЗГОТОВЛЕНИЯ

*Розглянуто спосіб адаптивного розділення на шари вихідної тріангуляційної 3D моделі виробу при його пошаровому виготовленні. Для підвищення продуктивності процесу й регулювання точності виготовлення виробів величину кроку побудови для кожного окремого опускання робочої платформи генеративної установки формоутворення вибирають на підставі розрахункових залежностей, що враховують кути нахилу відповідних поверхонь виробу до вектора побудови. Приведено приклади застосування пропонованого способу при побудові виробів технологіями швидкого прототипування й виготовлення.*

***Ключові слова:*** *технології швидкого прототипування й виготовлення, пошарова побудова, тріангуляційна модель, STL-файл.*

*Рассмотрен способ адаптивного разделения на слои исходной триангуляционной 3D модели изделия при его послойном изготовлении. Для повышения производительности процесса и регулирования точности изготовления изделий величину шага построения для каждого отдельного опускания рабочей платформы генеративной установки формообразования выбирают на основании расчетных зависимостей, учитывающих углы наклона соответствующих поверхностей изделия к вектору построения. Приведены примеры применения предлагаемого способа при построении изделий технологиями быстрого прототипирования и изготовления.*

***Ключевые слова:*** *технологии быстрого прототипирования и изготовления, послойное построение, триангуляционная модель, STL-файл.*

*The method of adaptive slicing of input triangulation 3D model of a product at its layer-by-layer manufacturing is considered in this article. For productivity improvement of process and accuracy control of products manufacturing, pitch distance of building for each separate lowering a working platform of generative apparatus of fabrication is chosen on the basis of the design formulas which consider slope angles of corresponding surfaces of product to building vector. Examples of application of the offered method are given at building products by technologies of rapid prototyping and manufacturing.*

***Key words:*** *technologies of rapid prototyping and manufacturing, layer-y-layer building, triangulation model, STL-file.*

**Постановка проблемы.** Быстрое прототипирование и изготовление относится к новым технологиям, позволяющим генерировать физические объекты непосредственно из геометрических данных, не прибегая к использованию традиционных инструментов. Процессы быстрого прототипирования и изготовления по своей сути состоят из нескольких этапов: формирования поперечных сечений изготовляемого изделия, послойного наложения сечений и комбинирования слоев. Одним из требований для изготовления какого-либо изделия является наличие информации о поперечных сечениях его модели.

**Анализ литературы.** Существуют различные процессы быстрого прототипирования, но все они имеют единую идеологию изготовления изделий – прототип изготавливается путем послойного построения. Основное преимущество данных технологий состоит в том, что изделие изготавливается за один прием, а исходными данными для него служит непосредственно виртуальная 3D модель изделия. Недостатком является ограниченность выбора материала [1, 2].

Известны способы построения изделий послойными методами на установках быстрого прототипирования и изготовления, при которых изделия изготовляются путем последовательного неразъемного соединения элементарных слоев объема материала, в качестве которого могут выступать полимер, керамика, бумага, металл и др. [3–8].

Послойные методы предполагают прямой переход от виртуальной 3D CAD модели к материализованному объекту. При данных способах 3D CAD модель изделия рассекается на серию последовательных очень тонких слоев, обычно 0,025–0,2 мм толщиной, с некоторым постоянным дискретным шагом построения. Толщина слоя ограничивается технологическими возможностями применяемой установки быстрого про-

тотипирования и изготовления. Недостатком этих способов является возникновение различных погрешностей формообразования по поверхностям различных изделий. Под погрешностью формообразования понимается избыточная часть материала на поверхности изделий, возникающая вследствие технологических особенностей процесса послойного изготовления изделий.

В работе [9] приводится способ построения изделий послойными методами с переменным шагом построения с обеспечением заданной величины погрешности формообразования.

При осуществлении этого способа для построения 3D модели изделие должно иметь аналитическое описание поверхности в доступной для анализа форме. Модель изделия разделяется на $n$ слоев, которые с точки зрения математического описания представляют 2D модели. Каждое сечение или слой модели (перпендикулярный направлению перемещения стола) представляет собой двухмерные модели и задается в определенной системе координат. Далее подбирается шаг стола с учетом взаимного расположения поверхностей и с условием, что будет обеспечена допустимая точность.

Недостатком предлагаемого подхода является условие наличия аналитического описания поверхности модели изделия, что ограничивает его применение к более сложным изделиям, а также то, что для расчета величины шага стола необходимо рассчитывать угол наклона поверхности к направлению перемещения стола, а для этого необходимо найти касательную к рассматриваемой поверхности. Указанные недостатки в совокупности ведут к увеличению технологического времени изготовления изделий за счет возникновения предварительной работы по подготовительным операциям, что снижает производительность процесса изготовления в целом.

**Цель** данной **статьи** – предложить расширение применения способа послойного построения изделий без ограничений на их сложность, выявить возможность регулирования точности изготовления по поверхности отдельных деталей и изделия в целом, а также повышения производительности самого процесса.

**Изложение основного материала.** Технический результат достигается при осуществлении способа послойного построения изделий на базе исходной триангуляционной 3D модели, включающего периодическое опускание рабочей платформы генеративной установки формообразования на величину шага построения и последующего формирования слоев изделий.

В целях повышения производительности процесса и регулирования точности изготовления изделий величину шага построения изменяют для каждого отдельного опускания рабочей платформы по следующей зависимости:

$$h_i = \Delta / \cos \varphi_{i(\min)}, \qquad (1)$$

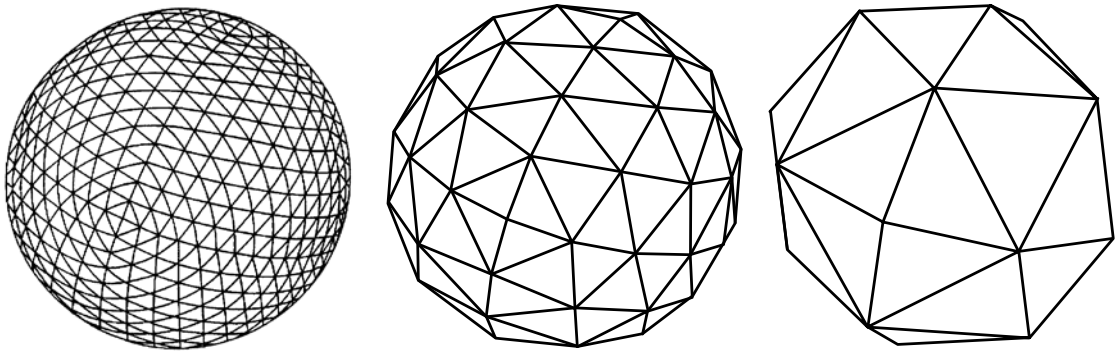
где $h_i$ – величина шага построения на $i$-м этапе опускания рабочей платформы;

$\Delta$ – допустимая погрешность формообразования изделия;

$\varphi_{i(\min)}$ – минимальное значение из всех рассчитанных величин углов между нормальными векторами плоскостей треугольников триангуляционной 3D модели, принадлежащих $i$-му слою изделия и направлением построения изделия.

Рассмотрим адаптивное разделение на слои на базе триангуляционной 3D модели сферы. Как показано на рис. 1, типичные CAD программные пакеты (например, 3D Systems, 1988), модели твердотельных объектов, такие как сфера, представляют в виде набора треугольных граней. При этом качество аппроксимации модели сферы напрямую зависит от их количества, иными словами 3D модель изделия триангулируется. На рис. 1 изображена исходная модель сферы, но аппроксимированная различным числом треугольников: 1450, 450 и 67 треугольниками соответственно.

К сожалению, вышеуказанные CAD системы сохраняют данные о триангуляционной 3D модели изделия в такой форме, что информация об элементах (треугольниках) такой модели сохраняется независимо друг от друга, без какой-либо информации об отношении одного треугольника относительно другого.



1450 треугольников 450 треугольников 67 треугольников

**Рис. 1. Аппроксимация модели сферы различным числом треугольников.**

На рис. 2 представлена триангуляционная 3D модель сферы, аппроксимированная 450 треугольниками и рассекаемая двумя секущими плоскостями с координатами $Z_{i-1}$ и $Z_i$ соответственно. На каждом шаге рассматриваются только те треугольники, которые принадлежат текущему $i$-му слою, образованному соответствующими секущими плоскостями.

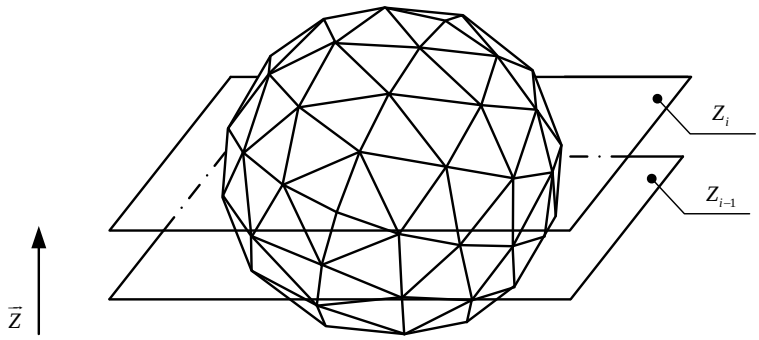



**Рис. 2. Триангуляционная 3D модель сферы с двумя секущими плоскостями.**

На рис. 3 представлены поверхности двух выборочных треугольников в разрезе, нормали $\vec{n}_{i,1}$ и $\vec{n}_{i,2}$ к их поверхностям, углы $\varphi_{i,1}$ и $\varphi_{i,2}$, образованные нормалями и направлением построения изделия, две секущие плоскости с координатами $Z_{i-1}$ и $Z_{i(\text{факт.})}$ соответственно.

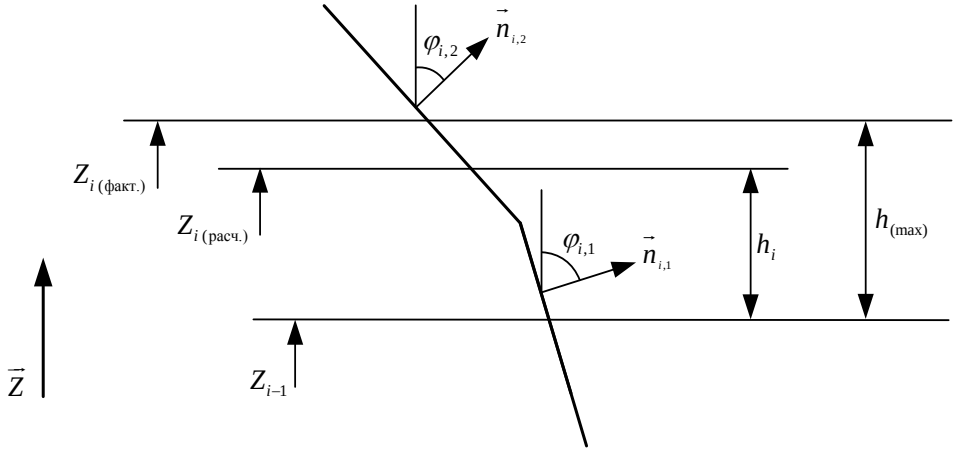



**Рис. 3. Схема расчета величины шага построения изделия для каждого отдельного опускания стола при осуществлении предлагаемого способа.**

По умолчанию за величину шага построения изделия берется его максимальная величина $h_{\max}$, заданная оператором, т. е. $Z_{i(\text{факт.})} = Z_{i-1} + h_{\max}$. Далее производится расчет величин углов $\varphi_{i,1}$ и $\varphi_{i,2}$, берется наименьший из них и согласно формуле (1) на основе допустимой величины погрешности формообразования $\Delta$ вычисляется расчетная величина шага построения $h_i$. Расчетная секущая плоскость $Z_{(\text{расч.})}$, которая берется за основную, определяется по зависимости $Z_{i(\text{расч.})} = Z_{i-1} + h_i$. В общем случае для каждого слоя выбор наименьшего угла производится по сле-

дующей зависимости:

$$\varphi_{i(\min)} = \min(\varphi_{i,j}), \quad j = 1\ldots N, \qquad (1)$$

где $\varphi_{i(\min)}$ – минимальное значение из всех рассчитанных величин углов между нормальными векторами плоскостей треугольников триангуляционной модели, принадлежащих $i$-му слою изделия и направлением построения изделия;

$i$ – номер текущего слоя;

$N$ – количество треугольников в текущем слое.

В технологиях послойного построения изделий примерно 60% общего времени по подготовке 3D модели изделия отводится генерированию слоев, т. е. разделению ее на совокупность элементарных слоев.

Более того, большая часть времени занимает работа по нахождению треугольников, которые находятся между двумя последовательными секущими плоскостями, и вычислению точек пересечения для генерирования данных о слое.

В современных установках послойного построения изделий шаг построения является величиной постоянной и задается оператором вручную, исходя из технологических особенностей применяемой установки. Предлагаемый адаптивный способ позволяет выбирать шаг построения изделий на каждом этапе согласно формуле (1).

На рис. 4 для наглядности схемы дополнены изображениями ступенчатого построения изделий.

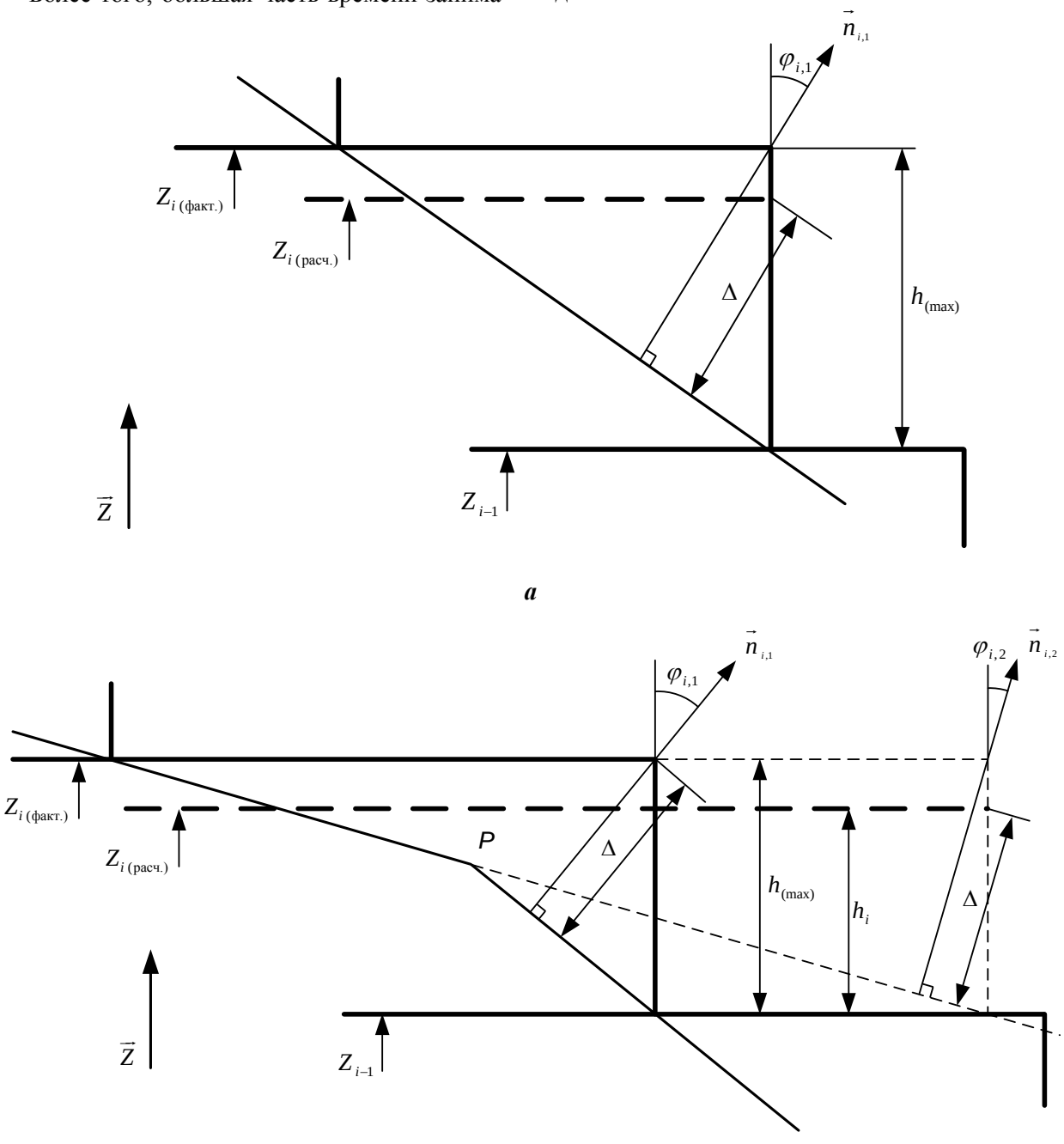



**Рис. 4. Схемы расчета значения шага построения на *i*-м этапе: *а* – случай, когда все треугольники, при-**

**надлежащие текущему слою, образуют одинаковый угол с вектором направления построения; *б* – случай, когда треугольники образуют различные углы с вектором направления построения.**

На рис. 4*а* представлена схема расчета значения шага построения на *i*-м этапе для случая, когда все треугольники, принадлежащие текущему слою, образуют одинаковый угол с вектором направления построения.

На рис. 4*б* представлена схема расчета значения шага построения на *i*-м этапе для случая, когда все треугольники, принадлежащие текущему слою, образуют различные углы с вектором направления построения. Показано, за счет чего уменьшается величина шага построения для поверхности с меньшим углом между ее нормалью и направлением построения изделия по сравнению с поверхностью с большим углом. Для этого плоскость треугольника с меньшим углом между ее нормалью и направлением построения изделия условно продолжается до плоскости нижнего сечения. Перпендикулярно к данной плоскости откладывается отрезок длиной Δ. Далее рассчитывается величина шага построения $h_i$ для этого случая аналогично согласно формуле (1).

Для осуществления предложенного способа производилось моделирование построения тестовых изделий, изображенных на рис. 5. Допуск на изготовление тестовых изделий 50 мкм.

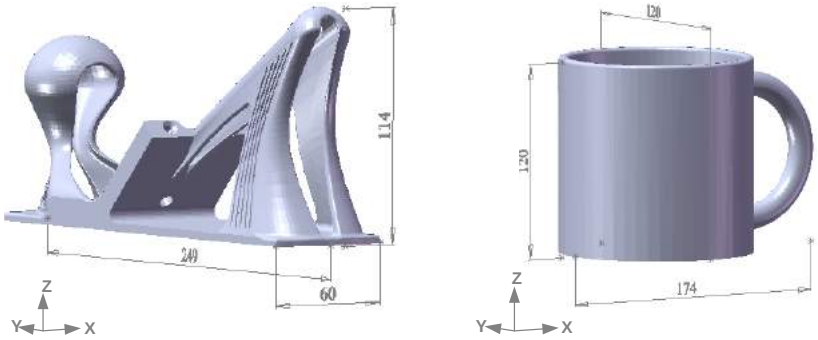



**Рис. 5. 3D модели тестовых изделий корпуса рубанка и кружки для осуществления предлагаемого способа послойного построения изделий.**

В первом случае имеем модель корпуса рубанка с габаритными размерами по осям координат 60×249×114 мм соответственно. Для построения изделия модель разбивается на слои, обычно 0,025–0,2 мм толщиной, с некоторым постоянным дискретным шагом построения. Для более точного изготовления изделия необходимо использовать минимальный шаг построения. При использовании минимального шага, равного 0,025 мм, модель изделия высотой 114 мм будет разбита на 4560 слоев. Применение данного способа построения изделий с погрешностью формообразования, равной 0,05 мм, изделие будет разбито на 2045 слоев, что существенно сокращает время построения изделия (в ≈2,2 раза).

Во втором случае имеем модель кружки с габаритными размерами по осям координат 174×120×120 мм соответственно. При использовании минимального шага, равного 0,025 мм, модель изделия высотой 120 мм будет разбита на 4800 слоев. Применение данного способа построения изделий с погрешностью формообразования, равной 0,05 мм, изделие будет разбито на 1392 слоев, что существенно сокращает время построения изделия (в ≈3,5 раза).

В случаях, когда рассчитанная величина шага построения выходит за границы минимального и максимального значений шагов построения изделий, а они, в свою очередь, определяются технологическими возможностями установки послойного изготовления изделий, за расчетную величину шага построения в данном случае принимают одно из ближайших предельных значений $h_{\min}$ или $h_{\max}$ соответственно.

**Выводы.**

1. Использование предлагаемого способа позволяет регулировать точность изготовления изделий. При расчете величины шага построения (толщины слоя) учитывается допустимая величина погрешности формообразования изделий Δ. Вследствие этого имеется возможность контролировать процесс изготовления изделий с погрешностью формообразования в пределах заданной максимальной величины.

2. Преимуществом предлагаемого адаптивного способа разделения на слои является также то, что для его осуществления может быть использован наиболее простой, в сравнении с аналогичными способами, метод. Поверхность модели изделия не требует аналитического описания, она задана в исходном STL-файле, автоматически создаваемым современными системами 3D CAD моделирования.

3. Следующее преимущество предлагаемого способа заключается в том, что данный способ выбора шага построения изделий реализован в

программе. Таким образом, отсутствует необходимость в ручном труде оператора установки послойного изготовления изделий. Программа автоматически рассчитывает шаги построения изделий любой сложности на основании введенного значения допустимой величины погрешности формообразования, а также минимального и максимального значений шага построения.

ЛИТЕРАТУРА


1. Интегрированные технологии ускоренного прототипирования и изготовления : монография / [Товажнянский Л. Л., Грабченко А. И., Чернышов С. И. и др.]; под ред. Л. Л. Товажнянского, А. И. Грабченко. – [2-е изд.]. – Харьков: ОАО «Модель Вселенной», 2005. – 224 с.
2. Ли К. Основы САПР (CAD/CAM/CAE) / К. Ли. – СПб.: ПИТЕР, 2004. – 560 с.
3. Пат. 4863538 США, МПК B 27 N 3/00, B 32 B 31/00, B 23 K 9/00, B 29 C 67/00. Method and apparatus for producing parts by selective sintering / Carl R. Deckard; Board of Regents, The University of Texas System. – № 920580 ; filed 17.10.1986 ; date of print 05.09.1989.
4. Пат. 5184307 США, МПК G 06 F 15/46, B 29 C 35/08, B 29 C 67/00. Method and apparatus for production of high resolution three-dimensional objects by stereolithography / Charles W. Hul, Stuart T. Spense, David J. Albert and other; 3D Systems, Inc. – № 331644 ; filed 31.03.1989 ; date of print 02.02.1993.
5. Пат. 5247180 США, МПК B 29 C 35/08. Stereolithographic apparatus and method of use / Larry D. Mitcham, William E. Nelson; Texas Instruments Incorporated. – № 814859 ; filed 30.12.1991 ; date of print 21.09.1993.
6. Пат. 5437964 США, МПК G 03 C 5/00, G 03 C 1/725, C 08 F 2/46. Stereolithography using vinyl ether-epoxide polymers / Stephen C. Lapin, James R. Snyder, Eugene V. Sitzmann and other; Allied-Signal Inc. – № 201146 ; filed 24.02.1994 ; date of print 01.08.1995.
7. Пат. 5663883 США, МПК G 06 F 19/00. Rapid prototyping method / Charles L. Thomas, Zetian Wang; University of Utah Research Foundation. – № 517092 ; filed 21.08.1995 ; date of print 02.09.1997.
8. Пат. 5902538 США, МПК B 29 C 35/08, B 29 C 41/02. Simplified stereolithographic object formation methods of overcoming minimum recoating depth limitations / Theodor R. Kruges, Chris R. Manners, Hop D. Hguyen; 3D Systems, Inc. – № 08/920428 ; filed 29.08.1997 ; date of print 11.05.1999.
9. Вітязєв Ю. Б. Розширення технологічних можливостей прискореного формоутворення способом стереолітографії : автореф. дис. на здобуття наук. ступеня канд. техн. наук : спец. 05.02.08 «Технологія машинобудування» / Ю. Б. Вітязєв. – Харків, 2004. – 20 с.

УДК 621.002.54

**Богуцкий В. Б., Шрон Л. Б., Мануйленко В. М.**

# ОСОБЕННОСТИ ПОДГОТОВКИ ДЕТАЛЕЙ К СОПРЯЖЕНИЮ ПО ЭКСПЛУАТАЦИОННОМУ КРИТЕРИЮ

*Приведені результати експериментального дослідження впливу методів доведення точних поверхонь на якість збірки по критерію надійності. Розроблена номограма для практичного застосування.*

***Ключові слова:*** *якість поверхні, точність, посадочні отвори, збірка деталей, доведення.*

*Приведены результаты экспериментального исследования влияния методов доводки точных поверхностей на качество сборки по критерию надежности. Разработана номограмма для практического применения.*

***Ключевые слова:*** *качество поверхности, точность, посадочные отверстия, сборка деталей, доводка.*

*The results of experimental research of influencing of methods of polishing of exact surfaces are resulted on quality of assembling on the criterion of reliability. The monogram is developed for practical application.*

***Key words:*** *quality of surface, exactness, landing openings, assembling of details, polishing.*

**Постановка проблемы.** Повышение качества машин и приборов ставит перед промышленностью актуальную задачу получения высокоточных посадок деталей и узлов при высокой стабильности процессов сборки. Особенностью таких посадок является то, что финишные операции над посадочными поверхностями выполняются над почти готовыми, весьма сложными деталями или на целом узле, себестоимость которых на этой стадии технологического процесса весьма высока.

**Анализ литературы.** В работах [1, 2] исходя из эксплуатационных требований к посадке повышенной точности и учитывая, что при сборке изменяются предварительные размеры и микрорельеф деталей, в качестве критерия оптимально-

сти выбрано изменение усилия сборки, приходящееся на одну сборку $X$ при первых пяти сборках:

$$X = \frac{\Delta P}{5}. \qquad (1)$$

Здесь $\Delta P$ – общее изменение усилия сборки за первые пять сборок. Задача решена методом планирования эксперимента [1] на основании результатов статистических исследований.

**Цель** нашей **статьи** – предложить методику выбора метода доводки посадочных поверхностей на основе анализа особенностей формирования микрорельефа и критериев эксплуатационной надежности высокоточных деталей.

**Изложение основного материала.** Для исследования было проведено планирование эксперимента. Для этого было предложено использовать полуреплику полнофакторного эксперимента типа $2^{4-1}$, матрица факторов для которого приведена в табл. 1.

**Таблица 1.**

**Матрица факторов.**

| Факторы / Уровни | Вид обработки Δ | Вид доводки *P* | Припуск *Z* |
|---|---|---|---|
| max | 0,4 | 90 | 3,5 |
| min | 0,2 | 4 | 0,5 |
| ε | 0,2 | 86 | 3 |

***1. Состояние микрорельефа перед доводкой.*** Этот фактор характеризуется безразмерным комплексом Δ [2]. Для шлифованных поверхностей Δ = 0,4; для точеных – с теми же высотными характеристиками, что и у шлифованных деталей, Δ = 0,2.

***2. Метод доводки*** характеризуется величиной радиального усилия $P$ в паре деталь – инструмент. По предварительно проведенным исследованиям было предложено для притирки 4 Н, для обкатки 90 Н.

***3. Величина снимаемого припуска*** $Z$ составляет 0,5–3,5 мкм. Натяги при экспериментальных сборках не превышали 1–2 мкм.

При построении плана эксперимента учтены взаимодействия между факторами.

Зависимость отыскивается в виде линейной модели типа:

$$J = \theta_0 + \theta_1 x_1 + \theta_3 x_3 + \theta_4 x_1 x_2 + \theta_5 x_2 x_3 .$$

Измерения $x$ проведены на установке, разработанной на кафедре технологии машиностроения Севастопольского национального технического университета (г. Севастополь). Результаты замеров приведены в табл. 2.

В качестве объектов использованы подшипники и цапфы из материалов 1Х13, 1Х17Н2, 2Х18Н9.

**Таблица 2.**

**Исходные данные.**

| | Вид обработки Δ | Вид доводки *P* | Припуск *Z* | *P·Z* | Δ·*Z* | $\theta_0'$ | $\theta_1'$ | $\theta_2'$ | $\theta_3'$ | $\theta_4'$ | $\theta_5'$ |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| $f_0$ | $f_1$ | $f_2$ | $f_3$ | $f_4 = f_2 \cdot f_3$ | $f_5 = f_1 \cdot f_2$ | $J \cdot f_0$ | $J \cdot f_1$ | $J \cdot f_2$ | $J \cdot f_3$ | $J \cdot f_4$ | $J \cdot f_5$ |
| +1 | – | – | – | + | + | –1,26 | –1,26 | –1,26 | –1,26 | +1,26 | +1,26 |
| +1 | – | – | + | – | + | 1,08 | –1,08 | –1,08 | +1,08 | –1,08 | +1,08 |
| +1 | – | + | – | – | – | 0,21 | –0,21 | +0,21 | –0,21 | –0,21 | –0,21 |
| +1 | – | + | + | + | – | 0,10 | –0,10 | +0,10 | +0,10 | +0,10 | –0,10 |
| +1 | + | | | + | – | 1,18 | +1,18 | –1,18 | –1,18 | +1,18 | –1,18 |
| +1 | + | – | + | – | – | 1,02 | +1,02 | –1,02 | +1,02 | –1,02 | –1,02 |
| +1 | + | + | – | – | + | 0,24 | +0,24 | +0,24 | –0,24 | –0,24 | +0,24 |
| +1 | + | + | + | + | + | 0,11 | +0,11 | +0,11 | +0,11 | +0,11 | +0,11 |
| ∑ | | | | | | 5,20 | –0,1 | –3,88 | –0,58 | +0,1 | +0,18 |
| $\frac{\Sigma}{8}$ | | | | | | 0,65 | –0,013 | –0,485 | –0,072 | +0,013 | +0,0225 |

$$f_1 = \frac{2\Delta - (\Delta\max - \Delta\min)}{\varepsilon\Delta} = \frac{2\Delta - (0{,}4 + 0{,}2)}{0{,}2} = 10x_1 - 3;$$

$$f_2 = \frac{2\Delta - (P\max - P\min)}{\varepsilon P} = \frac{2P - (90 + 4)}{86} = 0{,}0232\,x_2 - 1{,}092;$$

$$f_3 = \frac{2Z - (Z\max - Z\min)}{\varepsilon Z} = \frac{2Z - (3{,}5 + 0{,}5)}{3} = 0{,}67x_3 - 1{,}34;$$

$$f_4 = f_2 \cdot f_3 = (0{,}0232 \times 2 - 1{,}092)(0{,}67 \times 3 - 1{,}34) = 0{,}0155 \times 2 \times 3 - 0{,}733 \times 2 + 1{,}80;$$

$$x = \frac{\Delta \cdot P}{s} = 0{,}65 - 0{,}013(10x_1 - 3) - 0{,}485(0{,}0232x_2 - 1{,}092) - 0{,}072(0{,}67x_3 - 1{,}34) =$$

$$= 0{,}013(0{,}0155x_2x_3 - 0{,}0733x_3 - 0{,}0311x_2 + 1{,}80) + 0{,}0255(0{,}232x_1x_2 - 0{,}0696x_2 - 10{,}92x_1 + 3{,}276) =$$

$$= 0{,}65 - 0{,}13x_1 + 0{,}039 - 0{,}0113x_2 0{,}530 - 0{,}048x_3 + 0{,}096 + 0{,}000202x_2x_3 - 0{,}0095x_3 - 0{,}000405x_2 +$$

$$+ 0{,}0234 + 0{,}00522x_1x_2 - 0{,}0016x_2 - 0{,}246x_1 + 0{,}074$$

С заменой индексов:

$$x = 1{,}41 - 0{,}376\Delta - 0{,}013P - 0{,}057Z + 0{,}005\Delta \cdot P + 0{,}0002Z \cdot P \approx$$

$$\approx 1{,}41 - 0{,}38\Delta - 0{,}013P - 0{,}06Z + 0{,}005\Delta \cdot P = 0{,}0002Z \cdot P. \qquad (2)$$

$$\begin{cases} 1, \Delta < 0{,}5 \\ P > 100H \\ Z < 4мкм \\ 0, остальное \end{cases}$$

Результаты вычислений приведены в табл. 3.

**Таблица 3.**

**Результаты проверки статической значимости коэффициентов уравнений (2).**

| $J_i$ | $J^2$ | $J_i - \bar{J}$ | $(J_i - \bar{J})^2$ |
|---|---|---|---|
| 1,26 | 1,58 | 0,93 | 0,865 |
| 1,08 | 1,17 | 0,52 | 0,270 |
| 0,21 | 0,044 | –0,61 | 0,372 |
| 0,10 | 0,010 | –0,64 | 0,409 |
| 1,18 | 1,40 | 0,75 | 0,562 |
| 1,02 | 1,2 | 0,37 | 0,137 |
| 0,24 | 0,0576 | –0,59 | 0,350 |
| 0,11 | 0,0121 | –0,64 | 0,490 |
| ∑ 5,20 | 5,294 | | 3,374 |

| $\theta_i'$ | $(\theta_i')^2$ |
|---|---|
| 0,65 | 0,422 |
| –0,013 | 0,0002 |
| –0,485 | 0,235 |
| –0,072 | 0,005 |
| 0,013 | 0,0002 |
| –0,0225 | 0,0004 |
| ∑ | 0,66 |

$$\bar{J} = \frac{5{,}20}{8} = 0{,}65 \qquad \sigma_1^2 = \frac{3{,}374}{8-1} = 0{,}482$$

Находим остаточный член $S^2_{ост}$:

$$S^2_{ост} = \sum 1_i^2 - N\sum \left(\theta_i^2\right)^2 = 5{,}294 - 8 \cdot 0{,}663$$

$$= 5{,}294 - 5{,}292 = 0{,}002 \quad ;$$

$$\sigma_э^2 = \frac{S^2_{ост}}{N-k} = \frac{0{,}002}{8-6} = 0{,}001.$$

Используем критерий Фишера:

$$F = \frac{\sigma_I^2}{\sigma_I^2} = \frac{0{,}482}{0{,}001} > \left[F_{табл_{\alpha=0{,}05}} = 3{,}44\right].$$

Ошибка определения коэффициентов оценена по *t*-критерию Стьюдента.

$$\sigma_{\theta_i}^2 = \frac{\sigma_I^2}{N} = \frac{0{,}001}{8} = 0{,}0012.$$

При доверительной вероятности β = 0,8

$t = 1{,}415$

$$t_1 = \frac{|\theta_1|}{\sigma\theta_1} = \frac{0{,}36}{0{,}14} = 2{,}57; \; t_2 = \frac{|\theta_2|}{\sigma\theta_2} = \frac{0{,}012}{8 \cdot 10^{-3}} = 1{,}5;$$

$$t_3 = \frac{|\theta_3|}{\sigma\theta_3} = \frac{0{,}06}{2{,}9 \cdot 10^{-3}} = 2{,}07;$$

$$t_4 = \frac{|\theta_4|}{\sigma\theta_4} = \frac{0{,}0002}{1{,}41 \cdot 10^{-4}} = 1{,}40 < 1{,}415;$$

$$t_5 = \frac{|\theta_5|}{\sigma\theta_5} = \frac{0{,}005}{2{,}23 \cdot 10^{-3}} = 2{,}24.$$

Результаты проверки нуль-гипотезы полученных результатов приведены в табл. 4.

**Таблица 4.**

**Проверка нуль-гипотезы.**

| $\theta_i$ | $\sigma^2\theta_i = \sum \theta_k^2 \cdot \sigma^2\theta_i^1$ | $\sigma\theta_i$ |
|---|---|---|
| $\theta_1 = 0{,}013\cdot 10 + 0{,}0225\cdot 10{,}1 = 0{,}36$ | $(100 + 101)\cdot 0{,}00012 = 0{,}0201 = 2\cdot 10^{-2}$ | 0,14 |
| $\theta_2 = 0{,}485\cdot 10{,}232+0{,}013\cdot 0{,}0311+0{,}0225\cdot 0{,}0696 = 0{,}012$ | $(0{,}0005 + 0{,}0009 + 0{,}0049)\cdot 0{,}00012 = 6{,}3\cdot 10^{-2}$ | $8\cdot 10^{-3}$ |
| $\theta_3 = 0{,}072\cdot 0{,}67 + 0{,}013\cdot 0{,}733 = 0{,}06$ | $(0{,}42 + 0{,}44)\cdot 0{,}00012 = 8{,}6\cdot 10^{-6}$ | $2{,}9\cdot 10^{-3}$ |
| $\theta_4 = 0{,}013\cdot 0{,}0155 = 0{,}0002$ | $0{,}00022\cdot 0{,}00012 = 2{,}2\cdot 10^{-8}$ | $1{,}41\cdot 10^{-4}$ |
| $\theta_5 = 0{,}0225\cdot 0{,}232 = 0{,}005$ | $0{,}05\cdot 0{,}00012 = 5\cdot 10^{-6}$ | $2{,}23\cdot 10^{-3}$ |

Таким образом, уравнение (2) окончательно принимает вид:

$$x = 1{,}41 - 0{,}38\Delta - 0{,}013P - 0{,}06Z + 0{,}005P\cdot\Delta \quad (3)$$

$$\begin{cases} 1, \Delta < 0{,}4 \\ P < 100H \\ Z = 4мкм \\ 0, остальное \end{cases}$$

Графическая интерпретация этого выражения показана на рис. 1. Там же, в левой части, приведена номограмма, позволяющая путем умножения $x$ получить $\Delta P = kx$, где ($k$ = 1÷5) и оценить пригодность подготовленной поверхности к многократным повторным сборкам.

Порядок пользования номограммой показан стрелками.

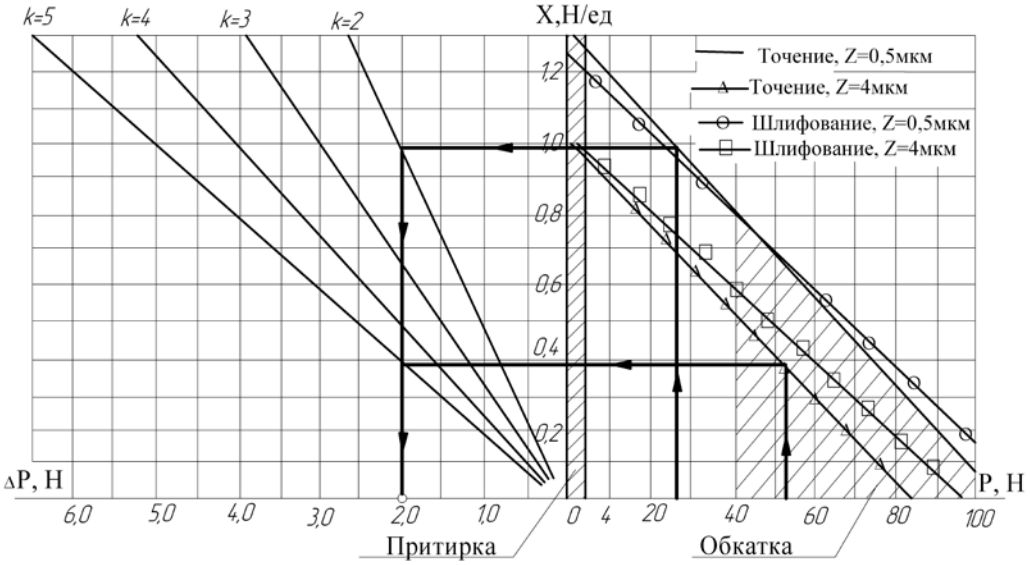



**Рис. 1. Номограмма выбора вида доводки поверхности в зависимости от метода ее предварительной обработки.**

**Выводы.**

1. Исследование особенностей поступающих на сборку деталей прецизионных пар малых диаметров и методов доводки показало, что в качестве доводочных операций следует рекомендовать притирку и обкатку (раскатку) роликами, так как они позволяют при одинаковых с другими методами трудозатратах получить микро- и макрогеометрию деталей, обеспечивающие более высокие эксплуатационные свойства. Установлено, что доводка обкатыванием – более управляемый процесс, чем притирка (значения коэффициентов корреляции больше). Поверхности деталей под доводку обкатыванием, полученные чистовым течением, предпочтительнее шлифованных, поскольку они обуславливают лучшее варьирование припуском при доводке. Шлифованная поверхность менее податлива обкатке. Доводка обкатыванием увеличивает сопротивляемость деталей износу и уменьшает усилия сборки при повторных сборках более чем в 5 раз по сравнению с притиркой.

2. Получены аналитические выражения зависимости удаляемого припуска от режимов доводки.

3. Выявлены характеристики микрорельефа поверхности и макрогеометрии деталей, доведенных притиркой и обкаткой.

ЛИТЕРАТУРА


1. Адлер Ю. П. Планирование эксперимента при поиске оптимальных условий / Ю. П. Адлер. – М. : Наука, 1971. – 364 с.
2. Комбалов В.С. Критерий оценки шероховатости поверхности и его влияние на жесткость стыков / В. С. Комбалов, В. В. Алисин // Жесткость в машиностроении : тезисы докладов Всесоюзной

научно-технической конференции. – Брянск, 1971. – С. 36–38.

УДК 621.923

**Новоселов Ю. К., Дымченко И. А.**

# МОДЕЛИРОВАНИЕ СЪЕМА МЕТАЛЛА ПРИ СУПЕРФИНИШИРОВАНИИ

*Математичні моделі та методики для розрахунку ймовірності видалення матеріалу в зоні контакту заготовки з інструментом при суперфінішуванні дозволять виявити основні закономірності знімання припуску при суперфінішуванні й розрахувати не тільки параметри поодиноких зрізів, але і параметри мікрорельєфу обробленої поверхні.*

***Ключові слова:*** *абразивна обробка, суперфінішування, якість поверхні, вірогідність видалення (невидалення) матеріалу, кінематичний розрахунок, знімання металу.*

*Математические модели и методики для расчета вероятности удаления материала в зоне контакта заготовки с инструментом при суперфинишировании позволят выявить основные закономерности съема припуска при суперфинишировании и рассчитать не только параметры единичных срезов, но и параметры микрорельефа обработанной поверхности.*

***Ключевые слова:*** *абразивная обработка, суперфиниширование, качество поверхности, вероятность удаления (неудаления) материала, кинематический расчет, съем металла.*

*Mathematical models and methods for calculating the probability of removal of material in the contact area with the tool with blanks superfinish would identify the main characteristics of rental allowances when superfinish and calculate not only the parameters of individual slices, but also the parameters of micropatterned surfaces*

***Key words:*** *abrasive treatment, superfinishing, quality of surface, probability of deleting (undeleting) of material, kinematics calculation, output of metal.*

**Постановка проблемы**. Суперфинишированиe является эффективным процессом отделочной обработки ответственных деталей машин и приборов: колец и роликов подшипников качения, шеек коленчатого и распределительного валов, поршневых пальцев, клапанов, шпинделей и пинолей станков, калибров.

При данной обработке достигается шероховатость поверхности $R_a$ = 0,160 ±0,020 мкм при съеме материала 10–20 мкм на диаметр. Этот процесс осуществляется при окружных скоростях заготовки 8–40 м/мин., давлениях мелкозернистых брусков (0,15–0,3 МПа) при их колебательном движении с частотой от 500–600 до 2000–3000 дв. ход./мин. и амплитудой 2–5 мм.

Суперфинишированиe дорожек качения колец подшипников на современных станках-автоматах осуществляется при более интенсивных режимах: окружной скорости заготовки 50–150 м/мин., давлении 0,5–1,5 МПа [1].

**Анализ литературы.** В работах [1, 2] утверждается, что при суперфинишировании практически полностью удаляется волнистость, значительно уменьшается огранка, удаляется дефектный поверхностный слой металла, образовавшийся при предшествующих операциях.

После суперфинишированиия упрочняется поверхностный слой без каких-либо структурных изменений, что существенно улучшает эксплуатационные свойства деталей, работающих в условиях трения скольжения или качения.

При определении режимов обработки базируются либо на табличных данных, либо исходя из соотношения окружной скорости детали $V_д$ и скорости колебаний бруска $V_к$ (так называемый угол α, где $\operatorname{tg}\alpha = \frac{V_к}{V_д}$).

В работе П. Е. Дьяченко [1] приведены примеры траекторий движения режущего зерна при различных режимах обработки.

Выбор соотношения скоростей и таких траекторий резания, когда они не совпадают друг с другом и улучшают чистоту поверхности, рекомендуется осуществлять по рисунку. Следует отметить, что угол наклона α обозначает разные понятия у разных исследователей. Например, у П. Е. Дьяченко [1, 2] этот угол определяется как отношение средней скорости возвратно-поступательного движения к средней скорости вращения детали, а в работах С. П. Соколова и З. И. Кременя [3] – как соотношение окружной скорости детали и скорости колебательного движения бруска.

В результате отсутствия единого определения угла α в литературе имеются противоречивые выводы. По мнению одних авторов [3, 4], при увеличении угла α шероховатость поверхности возрастает, по мнению других [1], меньшая шероховатость достигается при малых углах $\alpha \le 10°$. В связи с этим необходимо установ-

ление нового статического критерия для анализа процессов съема материала инструментом.

**Цель работы** – построить математическую модель для оценки параметров съема материала при суперфинишировании.

**Изложение основного материала.** В работе [5] рекомендовано в качестве такого критерия принимать вероятность съема материала, поскольку состояние в любой точке поверхностного слоя характеризуется двумя событиями: материал в точке может быть либо удален, либо не удален. Каждое событие имеет свою вероятность. Сумма вероятностей событий как событий противоположных равна единице, а значения вероятностей в общем случае могут зависеть от положения точки в граничной области материал – среда.

Согласно [6] вероятность неудаления материала при абразивной обработке для произвольной точки $M$ в переходной (граничной) области материал – среда вычисляется:

$$P(\overline{M}) = P(\overline{M}_0)e^{-a(y)}, \qquad (1)$$

где $P(\overline{M}_0)$ – вероятность неудаления материала на рассматриваемом уровне после предшествующей операции;

$a(y)$ – показатель, определяющий изменение вероятности неудаления материала на выполняемой операции, где $y$ – расстояние от поверхности заготовки до рассматриваемого уровня.

Если исходная поверхность заготовки имеет микрорельеф нерегулярного профиля, например, после шлифования, то зависимость для расчета вероятности удаления материала может быть представлена в виде:

$$P(M) = 1 - P(\overline{M}) = 1 - e^{-a_0 - a(y)}, \qquad (2)$$

где $a_0$ – показатель, определяющий вероятность удаления (неудаления) материала на предшествующей операции.

Для определения изменения вероятности удаления материала на фиксированном уровне $y$ при одном контакте заготовки с инструментом рассмотрим сечение заготовки плоскостью, которая проходит через ось заготовки.

Для фиксированного положения сечения в зоне контакта (рис. 1) материал заготовки будет удаляться только теми зернами, расстояние до вершин которых от условной наружной поверхности инструмента меньше $t_ф - y$.

Выделим из них зерна с координатой $u$ от условной наружной поверхности по глубине рабочего слоя инструмента, $t_ф - y \geq u \geq 0$. При прохождении через сечение их профиль пересекается уровнем $y$ на расстоянии $h = t_ф - y - u$ от вершины.

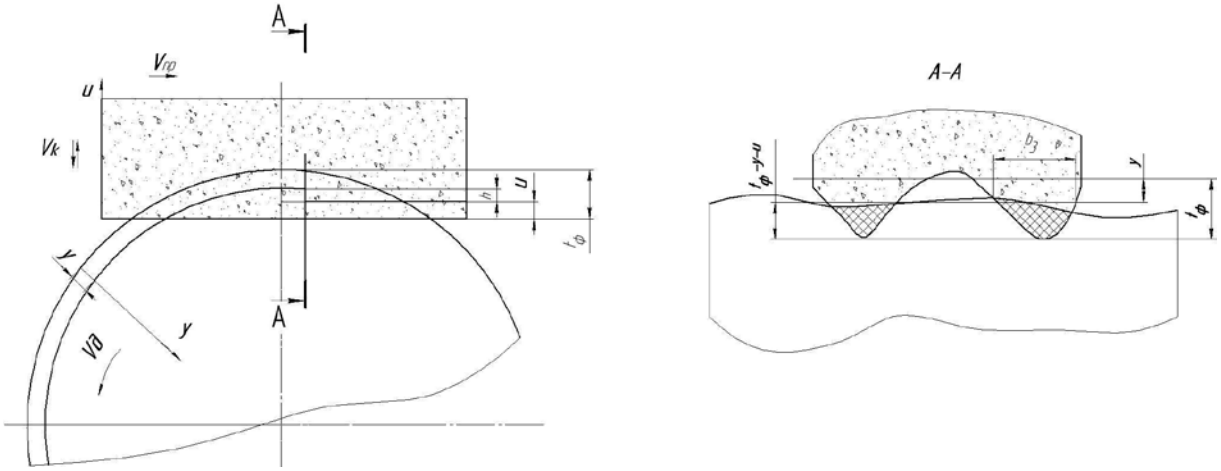



**Рис. 1. Схема процесса суперфиниширования для расчета вероятности съема материала в зоне контакта заготовки с инструментом.**

Ширина контура вершины, соответствующая данному уровню, при моделировании степенной зависимостью вычисляется по уравнению:

$$b_з = C_b h^m = C_b \left[ t_ф - y - u \right]^m , \qquad (3)$$

где $C_b$, $m$ – коэффициенты формы зерна.

За время $\Delta\tau$ сечение поворачивается на угол $\Delta\varphi$, и через него проходит участок с длиной дуги $V_\Sigma \Delta\tau$, где $V_\Sigma$ – скорость резания, которая определится как сумма векторов скоростей детали и бруска (рис. 2).

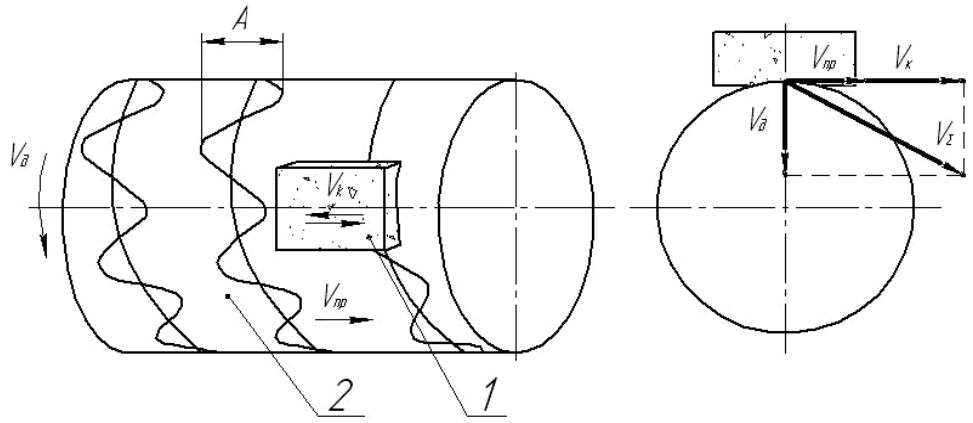



**Рис. 2. Схема суперфиниширования наружной цилиндрической поверхности: 1 – брусок абразивный, 2 – деталь.**

Исходя из типичной схемы суперфиниширования наружной цилиндрической поверхности, деталь 2 вращается с окружной скоростью $V_д$, а абразивные бруски 1, установленные в качающейся оправке, совершают возвратно-поступательное (колебательное) движение со скоростью $V_к$, перемещаясь вдоль оси детали со скоростью $V_{пр}$:

$$\overline{V}_\Sigma = \overline{V}_д + (\overline{V}_к + \overline{V}_{пр}) . \qquad (4)$$

В свою очередь скорость колебательного движения бруска равна:

$$V_к = A\omega \sin(\omega t + \varphi), \qquad (5)$$

где $A$ – амплитуда колебаний бруска;

$\omega$ – частота колебаний бруска;

$\varphi$ – начальная фаза колебаний бруска.

Переходя к скалярным величинам, получим:

$$V_\Sigma = \sqrt{V_д^{\,2} + (V_к + V_{пр})^2} = \sqrt{V_д^{\,2} + (A\omega \sin(\omega t + \varphi) + V_{пр})^2} . \qquad (6)$$

Из общего числа зерен, прошедших через сечение, ширину профиля $b_3$ будут иметь зерна, вершины которых расположены в слое круга $1\times\Delta u V_{\Sigma}\,\Delta\tau$. Число таких вершин вычисляется по плотности их распределения по глубине инструмента $f_{\xi u}(u)$:

$$\Delta\lambda = n_з f_{\xi u}(u)\Delta u V_{\Sigma}\Delta\tau\,. \qquad (7)$$

Изменение параметра $a(y;\tau)$ уравнения [1] определяется приращением суммы поперечных размеров профилей абразивных зерен:

$$\Delta a(y;\tau) = K_с n_з b_з f_{\xi u}(u)\Delta u V_{\Sigma}\Delta\tau\,, \qquad (8)$$

где $K_с$ – коэффициент стружкообразования, учитывающий, что не весь материал удаляется из объема риски, а часть его вытесняется, образуя по краям риски навалы.

Переходя от дискретной модели к непрерывной, получим интегральное уравнение, определяющее изменение параметра вероятности в зоне контакта:

$$a(y,\tau) = \int_0^{t_ф - y}\int_{\tau 0}^{\tau 2} K_с n_з b_з f_{\xi u}(u)\sqrt{V_д^{\,2} + (A\omega\sin(\omega t+\varphi)+V_0)^2}\,du d\tau\,, \qquad (9)$$

где $\tau_0$ и $\tau_2$ – время контакта точки с абразивным бруском.

При этом $\tau_0$ включает в себя начальную фазу $\varphi$ колебаний бруска, а $\tau_2 = \tau_0 + B/V_д$, где $B$ – ширина бруска.

Тогда выражение (9) примет вид:

$$a(y,\tau) = \int_0^{t_ф - y}\int_{\tau 0}^{\tau 2} K_с n_з b_з f_{\xi u}(u)\sqrt{V_д^{\,2} + (A\omega\sin\omega t + V_{пр})^2}\,du d\tau\,. \qquad (10)$$

Для упрощения расчетов и представления результатов в виде аналитических зависимостей целесообразно также выполнять аппроксимацию теоретических законов.

В работе [5] предложено аппроксимировать участок кривой распределения активных зерен по глубине инструмента степенной зависимостью вида

$$f_{\xi и}(u) = C_b u^{\chi-1}\,, \qquad (11)$$

где $C_b$ – коэффициент, вычисляемый из условия равенства единице площади, ограниченной кривой распределения:

$$C_b = \frac{\chi}{H_u^{\chi}}\,, \qquad (12)$$

где $H_u$ – глубина слоя рабочей поверхности инструмента, в пределах которой подсчитывается число абразивных зерен $n_3$.

Принятые модели вершин зерен и плотности их распределения по глубине позволяют перейти к установлению функциональных связей вероятности неудаления материала от технологических факторов. При подстановке в уравнение (10) полученных выражений $b_3$ и $f_{\xi u}(u)$ оно принимает вид:

$$a(y,\tau) = \frac{K_с n_3 C_b \chi}{H^{\chi}}\int_0^{t_ф - y}\int_{\tau 0}^{\tau 2} u^{(\chi-1)}(t_ф - y - u)^m\sqrt{V_д^{\,2} + (A\omega\sin\omega t + V_{пр})^2}\,du d\tau\,. \qquad (13)$$

После интегрирования уравнения (13) по $u$ получим:

$$a(y,z) = \frac{\Gamma(m+1)\Gamma(\chi)(t_ф - y)^{(\chi+m)} K_с C_b \chi n_з}{\Gamma(m+\chi+1)H^{\chi}}\int_{\tau 0}^{\tau 0 + B/V_д}\sqrt{V_д^{\,2} + (A\omega\sin\omega t + V_{пр})^2}\,. \qquad (14)$$

Дальнейшее интегрирование уравнения (14) возможно только при известных значениях показателей и составляющих скорости резания.

**Выводы.**

Предложены математические модели и методики для расчета вероятности удаления материала в зоне контакта заготовки с инструментом при суперфинишировании. Они позволяют выявить основные закономерности съема припуска при суперфинишировании и рассчитать не только параметры единичных срезов, но и параметры микрорельефа обработанной поверхности.

Таким образом, имея экспериментальные данные по обработке детали брусками, представится возможность спрогнозировать параметры качества поверхности детали, ее микрорельеф и, при необходимости, скорректировать режимы обработки.

ЛИТЕРАТУРА


1. Дьяченко П. Е. Современные направления в области обеспечения высокого качества поверхности детали / П. Е. Дьяченко. – М. : Издательство АН СССР, 1960. – 64 с.
2. Дьяченко П. Е. Суперфиниш в машиностроении / П. Е. Дьяченко. – М.: Издательство АН СССР, 1942. – 62 с.
3. Соколов С. П. Обработка деталей абразивными брусками / С. П. Соколов, З. И. Кремень. – Л. : Машиностроение [Ленингр. отделение], 1967. – 124 с.

4. Абразивная и алмазная обработка материалов: [справочник] ; под ред. А. Н. Резникова. − М. : Машиностроение, 1977. − 391 с.
5. Дымченко И. А. Кинематический расчет процесса суперфиниширования / И. А. Дымченко, Ю. К. Новоселов // Прогрессивные направления развития машино-приборостроительных отраслей и транспорта : материалы Международной научно-технической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых. – Севастополь, 2009. – С. 22–23.
6. Новоселов Ю. К. Динамика формообразования поверхностей при абразивной обработке / Ю. К. Новоселов. – Саратов : Изд-во Саратов. ун-та, 1979. – 232 с.

УДК 621.74.043

**Падерин В. Н., Галух В. И.**

# АВТОМАТИЧЕСКАЯ МАШИНА ДЛЯ ЛИТЬЯ ПОД ДАВЛЕНИЕМ ПЛОТНЫХ, ПРОЧНЫХ И ГЕРМЕТИЧНЫХ ОТЛИВОК

*У статті розглянуті пристрої, які дозволяють автоматизувати машину ливарні та за рахунок нової технології литва отримувати щільні, міцні і герметичні відливання.*

***Ключові слова:*** *автоматичний пристрій, прес-форма, пресуючи поршні, заливка розплаву, камера пресування, щільність, міцність, герметичність.*

*В статье рассмотрены устройства, позволяющие автоматизировать литейную машину и за счёт новой технологии литья получать плотные, прочные и герметичные отливки.*

***Ключевые слова:*** *автоматическое устройство, пресс-форма, прессующий поршень, заливка расплава, камера прессования, плотность, прочность, герметичность.*

*The article runs that the casting machine can be atomized using special devices. New casting technology will allow to receive dense, durable, and impermeable casts.*

***Key words:*** *automatic device, press-form, pressing piston, inundation of fusion, pressing chamber, density, durability, impermeability.*

**Постановка проблемы.** Литье под давлением (ЛПД) алюминиевых сплавов является прогрессивным, малоотходным и высокопроизводительным процессом получения точных отливок с качественной поверхностью, поэтому оно получило широкое промышленное применение в машиностроении, автомобильной, приборостроительной и других отраслях промышленности, а также при производстве изделий пневмоаппаратуры.

Однако этот способ литья в основном осуществляется в ручном режиме. Это связано с тем, что машины моделей 71107А, 71108А, 71109А, изготавливаемые Тираспольским заводом литейных машин им. С. М. Кирова, снабжены манипуляторами для заливки расплава и смазки пресс-форм, сложными по конструкции, громоздкими, неудобными в работе, значительно снижающими производительность труда за счет увеличения времени изготовления отливок. Кроме того, стоимость манипуляторов приближается к стоимости литейной машины, а автоматическая смазка прессующего поршня вообще не предусмотрена.

**Анализ литературы.** Анализ научной литературы и практика ЛПД показывают, что выпускаемые машины, снабженные устройствами для механизации, работают в производстве недостаточно надежно, при этом также увеличивается время изготовления отливок [1–3].

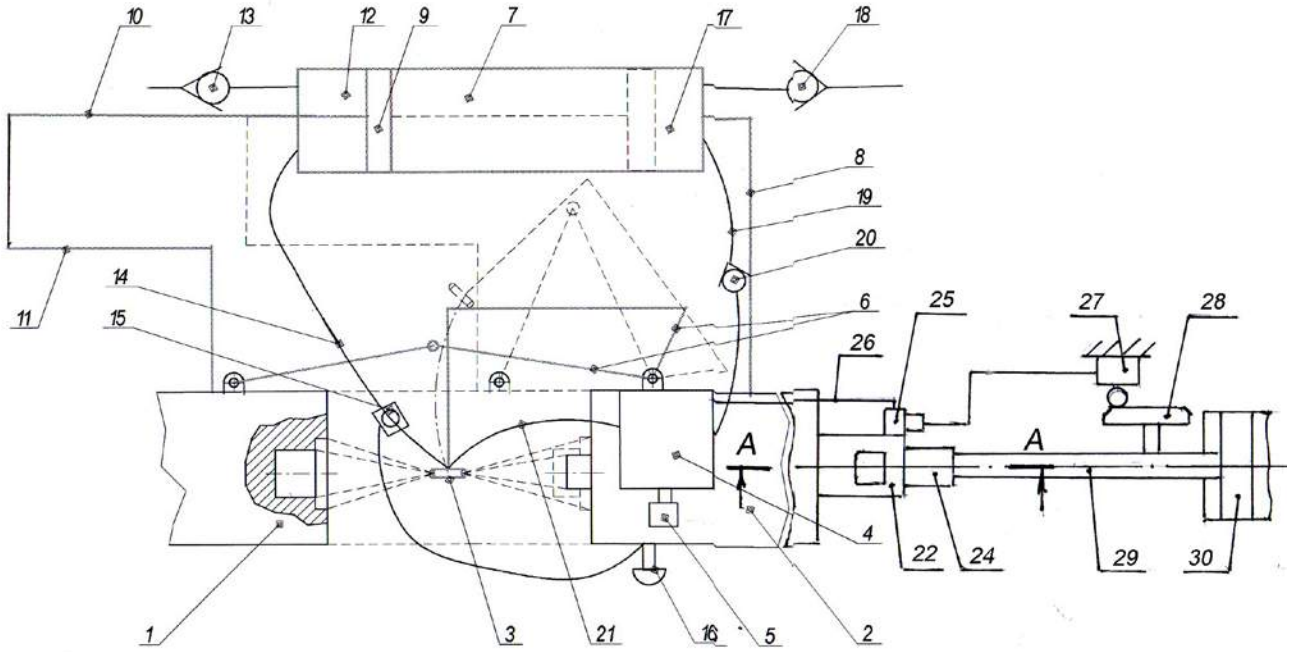
**Цель статьи** – описать устройства, позволяющие автоматизировать литейные машины и повысить плотность, прочность и герметичность (Г%) отливок ЛПД алюминиевых сплавов.

**Изложение основного материала.** С целью снижения тяжелого ручного труда за счет автоматизации процесса литья, трудоемкости изготовления отливок, а также повышения их плотности, прочности и герметичности (Г%) при ЛПД алюминиевых сплавов нами были автоматизированы существующие литейные машины, в которых операции смазки пресс-формы и прессующего поршня, заливки расплава в камеру прессования и удаления отливок из пресс-формы и литейной машины осуществляются автоматически и совмещаются с циклами раскрытия (закрытия) пресс-формы и прессования. Перечисленные операции защищены патентами [4–7].

А для повышения плотности, прочности и Г% отливок на литейные машины устанавливаются специальные пресс-формы с двумя камерами прессования [8], для которых разработана новая технология литья, а также применена нанотехнология при модифицировании расплава.

Автоматическое устройство для смазки пресс-форм (рис. 1а) работает при раскрытии и закрытии подвижной и неподвижной матриц, а автоматическое устройство для смазки прессующих поршней (рис. 1б) встроено в цикл прес-

сования литейной машины [5].




а б

**Рис. 1. Схемы автоматических устройств для смазки пресс-форм и прессующих поршней.**

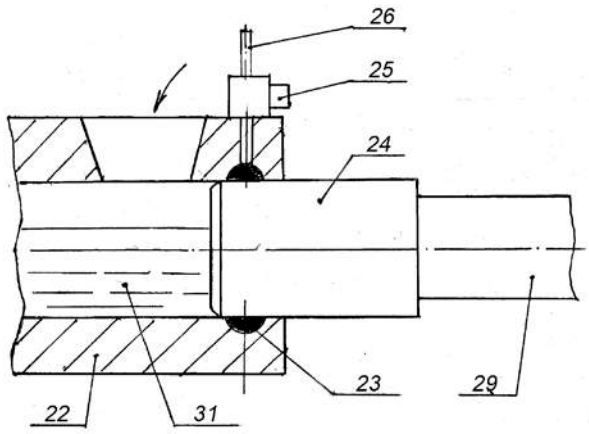



**Рис. 2. Разрез А–А, обозначенный на рис. 1.**

Рассмотрим автоматические устройства более подробно.

Отличительной особенностью автоматического устройства для смазки пресс-форм является наличие в нем пневмоцилиндра 7, который является источником образования сжатого воздуха, необходимого для работы форсунок, что позволяет заменить дорогостоящие компрессоры и компрессорные станции, потребляющие большое количество электроэнергии.

Устройство состоит из подвижной 1 и неподвижной 2 матриц пресс-формы, блока форсунок 3 с бачком со смазочным составом 4, снабженного регулятором давления воздуха 5, рычажного механизма 6, прикрепленного к матрицам 1 и 2 и к форсункам 3, распыляющих смазку пневмоцилиндра 7 расчетного диаметра и длины для образования сжатого воздуха, корпус которого через рычаг 8 соединен с матрицей 2, а его поршень 9 через шток 10 и рычаг 11 соединен с матрицей 1. При этом во время перемещения поршня 9 при раскрытии матриц 1 и 2 создается давление в штоковой полости 12 пневмоцилиндра 7, снабженного обратным пневмоклапаном 13. Полость 12 соединена через трубопровод 14 и электропневмораспределитель 15 с реле времени 16, настроенным на время удаления отливок из пресс-формы, с блоком форсунок 3, которые распыляют смазку.

Сжатый воздух, который создается в бесштоковой полости 17 пневмоцилиндра 7, снабженного обратным пневмоклапаном 18, через трубопровод 19 и другой обратный пневмоклапан 20, расположенный противоположно, при закрытии матриц 1 и 2 поступает в бачок со смазочным составом 4.

Кроме этого, в устройство входит камера прессования 22 с кольцевой канавкой 23 расчетного объема для масла, пресс-поршень 24 и электрогидроклапан 25, который с одной стороны соединен с кольцевой канавкой 23 камеры прессования 22, а с другой – трубопроводом 26 с бачком для масла 4, в котором находится давление, а также конечным выключателем 27 с планкой 28, установленной на прессующем штоке 29 гидроцилиндра прессования 30 для включения и выключения электрогидроклапана 25 по длине, равной прессовому поршню 24. В камеру прессования 22 залит расплавленный метал 31.

Устройство работает следующим образом. При раскрытии матриц 1 и 2 блок форсунок 3,

который распыляет смазку с помощью рычажного механизма 6, перемещается между ними до положения, при котором производится смазывание формообразующих поверхностей. При этом одновременно с движением рычажного механизма происходит перемещение поршня 9 пневмоцилиндра 7 через шток 10 и рычаг 11, в результате чего в штоковой полости 12 образуется сжатый воздух, необходимый для смазывания матриц.

После раскрытия матриц и извлечения из них отливок срабатывает реле времени 16, которое открывает электропневмоклапан 15, и сжатый воздух из штоковой полости 12 по трубопроводу 14 подходит к блоку форсунок 3 и, смешиваясь со смазочным составом, поступающим из бачка 4, находящегося под давлением, по трубопроводу 21 также подходит к блоку распыляющих форсунок 3, в результате чего происходит смазывание матриц. При этом обратные пневмоклапаны 13 и 20 закрыты, а обратный пневмоклапан 18 открыт. Это необходимо для того, чтобы в штоковой полости 12 и бачке со смазочным составом 4 было избыточное давление, а в бесштоковой полости 17 не образовывался вакуум.

После смазывания формообразующих поверхностей матрицы 1 и 2 закрываются, в результате чего блок форсунок 3, который распыляет смазку через рычажный механизм 6, возвращается в исходное положение. При этом поршень 9 пневмоцилиндра 7 через рычаг 11 и шток 10 перемещается также в исходное положение, в результате чего в бесштоковой полости 17 создается сжатый воздух, величина давления которого регулируется редукционным клапаном 5. Сжатый воздух через трубопровод 19 и обратный пневмоклапан 20 поступает к бачку 4, создавая давление на смазочный состав с целью его надежного поступления по трубопроводу 21 к форсункам блока 3, который распыляет. При этом пневмоклапаны 13 и 20 открыты, а пневмоклапан 18 закрыт. После этого цикл повторяется снова.

Кроме того, при движении пресс-поршня 24 по кольцевой канавке 23 во время запрессовки расплава 31 электрогидроклапан 25 открыт, и масло под давлением из бачка 4 поступает в канавку и смазывает поверхность пресс-поршня 24. После прохождения прессовым поршнем 24 кольцевой канавки 23 планка 28 через конечный выключатель 27 отключает электрогидроклапан 25, и масло прекращает поступать в кольцевую канавку 23 камеры прессования 22. При возвращении пресс-поршня 24 в начальное положение планка 28 через конечный выключатель 27 включает электрогидроклапан 25, и смазка снова поступает в канавку 23, смазывая пресс-поршень 24.

Рассмотренное автоматическое устройство для смазки пресс-форм и прессующих поршней без применения компрессоров в цикле работы литейной машины (см. рис. 1 и 2) позволяет дополнительно за счет создания вакуума в пневмоцилиндре 7 заливать алюминиевый расплав в камеру прессования в цикле закрытия матриц 1 и 2 после их смыкания. Это возможно в связи с тем, что алюминиевые сплавы имеют низкий удельный вес и легко поддаются заливке с помощью вакуума.

На рис. 3 показано простое автоматическое устройство для заливки расплава из плавильной печи в камеру прессования с помощью вакуума [6].

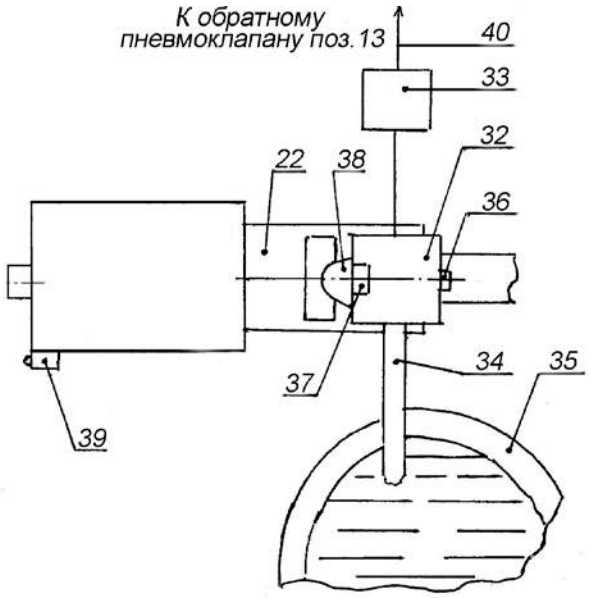



**Рис. 3. Автоматическое устройство для заливки расплава в камеру прессования.**

Для заливки расплава в камеру прессования 22 устройство для смазки пресс-форм и прессующих поршней (см. рис. 1 и 2) дополнительно снабжено вакуумным дозирующим устройством 32, установленным над заливочным окном камеры прессования 22 выше уровня расплава, который находится в тигле с датчикам объема дозы 36 и клапаном подачи расплава 37. Рабочая камера дозирующего устройства 32 с одной стороны соединена трубопроводом 40 и электропневмоклапаном 33, срабатывающим от датчика объема дозы 36 со штоковой полостью 12 пневмоцилиндра 7 (см. рис. 1), с другой стороны – трубопроводом 34 с тиглем плавильной печи 35.

При этом заливка расплава в камеру прессования 22 осуществляется через сливной патрубок 38, открывающийся клапаном подачи расплава 37 от включения конечного выключателя

39 планкой, установленной на подвижной матрице при полном закрытии полуформ.

Устройство для заливки расплава работает следующим образом. При смыкании матриц 1 и 2 (поскольку электропневмораспределитель 15 по окончании смазывания пресс-форм закрыт) в полости 12 пневмоцилиндра 7 создается вакуум, под действием которого через трубопровод 40, открытый электропневмоклапан 33 в вакуумном дозирующем устройстве 32 также создается разрежение, которое через трубопровод 34, соединенный с одной стороны с тиглем 35, а с другой – с вакуумным дозирующим устройством 32, поднимает расплав из тигля 35 до тех пор, пока он необходим.

При срабатывании датчика 36 срабатывает и электропневмоклапан 33, соединяющий полость 12 пневмоцилиндра 7 и вакуумное дозирующее устройство 32 с атмосферой, в результате чего подъем расплава останавливается, и расплав, что остался в трубопроводе 34, под весом тяжести стекает в тигель 35, а в вакуумном дозирующем устройстве 32 остается необходимая доза расплава. При этом трубопровод 34 присоединен к вакуумному дозирующему устройству выше датчика 36.

Потом после полного смыкания матриц 1 и 2 расплав заливается в камеру прессования 22. После этого происходит запрессовка расплава в пресс-форму, после кристаллизации матрицы 1 и 2 раскрываются, и цикл повторяется снова. При раскрытии матриц 1 и 2 планка отходит от конечного выключателя 39, клапан подачи расплава 38 закрывается для заполнения в вакуумное дозирующее устройство 32 новой дозы.

Для полной автоматизации процесса ЛПД необходимо автоматическое устройство для удаления отливок из пресс-формы и литейной машины в тару или обрезной пресс для удаления облоя и литниковой системы, которое показано на рис. 4 (вид на подвижную матрицу) [7].

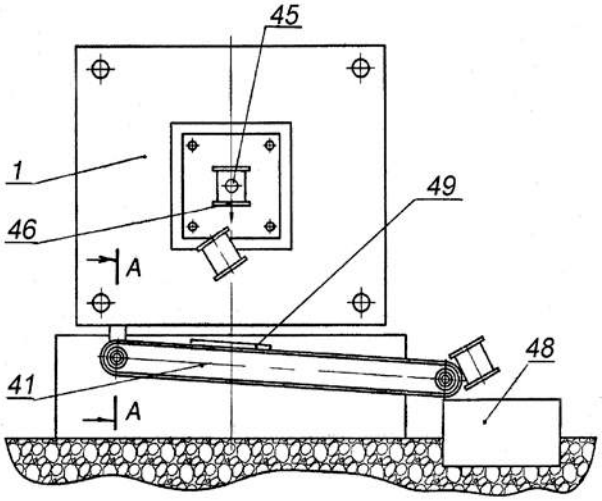



**Рис. 4. Автоматическое устройство для удаления отливок.**

На рис. 5 показан разрез А–А, обозначенный на рис. 4.

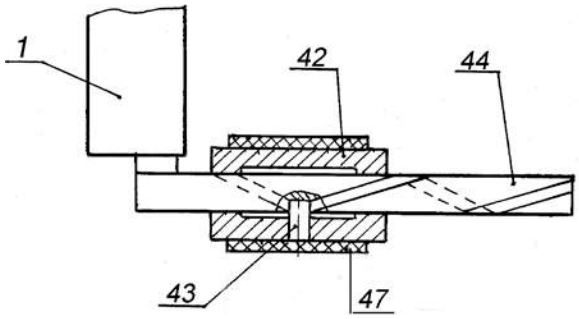



**Рис. 5. Разрез А–А, отображенный на рис. 4.**

Для удаления отливок литейная машина дополнительно снабжена ленточным транспортером 41, установленным внизу под матрицами 1 и 2 с трубчатым приводным валом 42, который через штифт 43 и вал 44 с винтовой канавкой расчетного шага жестко соединен с подвижной матрицей 1, которая дополнительно оборудована толкателем с приводом 45 для сталкивания отливок 46 с выталкивателей, установленных в матрице 1 на ленту 47 транспортера 41, по которому отливки 46 удаляются из литейной машины в тару 48 или в штамп для обрубания литниковой системы и облоя по контуру отливки.

Устройство работает следующим образом. При раскрытии матриц 1 и 2 происходит выталкивание отливок из матрицы 1 с помощью выталкивателей. Однако, учитывая, что они входят в тело отливок на глубину 0,2–0,5 мм, и отливки остаются держаться на выталкивателях, поэтому их сталкивание на ленту 47, транспортера 41 происходит с помощью дополнительного толкателя 45 с приводом.

Затем при смыкании матриц 1 и 2 отливки по ленте 47 транспортера поступают в тару или штамп для удаления литниковой системы с пресс-остатком, облоя по разъему и промывников, а при размыкании матриц 1 и 2 лента 47 транспортера 41 возвращается в начальное положение. Приводом толкателя 45 может быть механизм рычага с коромыслом, а также гидропневмокамеры или катушки с соленоидом и т. д.

Для защиты ленты 47 транспортера 41 от температуры отливок сверху на ленту 47, куда они падают, необходимо прикрепить асбестоцементную ленту 49 с длиной больше длины отливок или установить поддон, также покрытый асбестоцементной лентой.

Кроме того, для удаления отливок можно применять цепной конвейер с поддоном, тогда вместо трубчатого приводного вала 42 нужно использовать звездочку.

Наконец, вместо примененного устройства с бойнетной передачей можно применить конически-реечную передачу, в которой рейка жестко закреплена на матрице 1, а коничка установлена на трубчатом приводном валу или на звездочке, в результате чего схема удаления отливок из литейной машины не изменится.

Таким образом, разработанные нами простые автоматические устройства позволяют любому предприятию, использующему машины ЛПД, самому недорого изготовить эти конструкции и полностью автоматизировать процесс литья.

Для предприятий, которые должны выпускать плотную, прочную и Г% продукцию, второй задачей, кроме автоматизации, является изготовление отливок высокого качества. Это достигается следующими новыми способами:

1) стандартный технологический процесс ЛПД необходимо заменить способом ЛПД с двумя камерами прессования, который позволяет значительно снизить пористость отливок за счет кристаллизации расплавленного металла под высоким давлением [8];
2) модифицирование расплава необходимо производить с применением последних достижений в области нанотехнологий.

Рассмотрим применение нанотехнологий подробнее.

Применение этого способа для повышения качества литых деталей в настоящее время является одним из перспективных направлений. Этот процесс основан на модифицировании расплава для изменения его структуры.

В настоящее время в научно-технической литературе широко представлена информация по нанопорошкам (НП) разного вида, используемым для улучшения качества известных материалов и разработки материалов с новыми, измененными в требуемом направлении свойствами [9].

Нами разработан способ введения НП в алюминиевый сплав АК12М2 в составе нитрида итрия 0,05–0,07 и нитрида самария 0,02–0,04% [10]. Эти порошки представляют собой нанокластеры химических соединений, имеющих до 5 атомов с размерами частиц около 1 нм.

Введенные наноклестеры нитрида итрия являются центрами кристаллизации, они совместно с наноклестерами нитрида самария обеспечивают раздробление зерна и уменьшение размеров и количества пористости в алюминиевом расплаве, что позволяет увеличить механические свойства в 1,3–1,5 раза и уменьшить негерметичность литых деталей с 2,3–2,8% до 0,8–1%.

**Выводы.**

1. Предлагаемые устройства позволяют автоматизировать трудоемкий процесс смазывания пресс-форм и прессующих поршней, заливку расплава в камеру прессования и удаление отливок из литейной машины при ЛПД, не увеличивая цикла раскрытия и закрытия матриц.

2. Применение пресс-форм с двумя камерами прессования позволяют повысить плотность, прочность и Г% отливок.

3. Модифицирование расплава с помощью нанопорошков позволяет дополнительно повысить прочность и Г% отливок.

ЛИТЕРАТУРА


1. Белопухов А. К. Технологические режимы литья под давлением / А. К. Белопухов. – М. : Машиностроение, 1987. – 240 с.
2. Белопухов А. К. Литье под давлением. Проблемы подпрессовки / А. К. Белопухов. – М. : Машиностроение, 1971. – 285 с.
3. Падерин В. Н. Исследование влияния способа литья под давлением с двумя камерами прессования на пористость и герметичность отливок из алюминиевых сплавов / В. Н. Падерин, В. И. Галух // Ученые записки Крымского инженерно-педагогического университета. Выпуск 11. Технические науки. – Симферополь : НИЦ КИПУ, 2008. – С. 54–59.
4. Пат. на изобретение 71781 А Украина, МПК В 22 D 17/22. Автоматическое устройство для смазывания пресс-форм при литье под давлением / Падерин В. Н., Гресько А. И., Галух В. И., Иззетов Н. А., Лукьянов А. А. – № 20031212003 ; заявл. 22.12.2003 ; опубл. 15.12.2004, Бюл. № 12.
5. Пат. на полезную модель 40613 Украина, МПК В 22 D 17/22. Автоматическое устройство для смазывания пресс-форм и пресс-поршней при литье под давлением / Падерин В. Н., Падерин А. В. – № u200807288 ; заявл. 27.05.2008 ; опубл. 27.04.2009, Бюл. № 8.
6. Пат. на полезную модель 29639 Украина, МПК В 22 D 17/22. Автоматическое устройство для смазывания пресс-форм и заливки расплава при литье под давлением / Падерин В. Н., Галух В. И. – № u200708437; заявл. 23.07.2007 ; опубл. 25.01.2008, Бюл. № 2.
7. Пат. на изобретение 87081 Украина, МПК В 22 D 17/22. Автоматическое устройство для литья под давлением / Падерин В. Н., Падерин А. В. – № a200807331 ; заявл. 27.05.2008 ; опубл. 10.06.2009, Бюл. № 11.
8. Пат. на полезную модель 29636 Украина, МПК В 22 D 17/22. Способ литья под давлением с двумя камерами прессования / Падерин В. Н., Галух В. И. – № u200708338 ; заявл. 20.07.2007 ; опубл. 25.01.2008, Бюл. № 2.
9. Крушенко Г. Г. Применение нанопорошков химических соединений для улучшения качества металлоизделий / Г. Г. Крушенко // Технология машиностроения, 2002. – № 3. – С. 3–6.
10. Пат. на полезную модель 11728 Украина, МПК С 22 С 21/00. Способ введения нанопорошков в

алюминиевый сплав / Падерин В. Н., Гресько А. П., Шабдинов М. Л.. – № u200504851 ; заявл. 23.05.2005 ; опубл. 16.01.2006, Бюл. № 1.

УДК 621.923

**Ягьяев Э. Э.**

# РАЗРАБОТКА МОДЕЛИ ДИАГНОСТИКИ И ПРОГНОЗИРОВАНИЯ ПРОЦЕССА ЧИСТОВОГО ШЛИФОВАНИЯ

*У статті запропонована комплексна модель операції шліфування, що містить в своєму складі моделі окремих підсистем і залежності, що встановлюють закони взаємодії підсистем.*

***Ключові слова:*** *модель, шліфування, діагностика, прогнозування, експеримент, алгоритм, сила різання, точність.*

*В статье предложена комплексная модель операции шлифования, содержащая в своем составе модели отдельных подсистем и зависимости, устанавливающие законы взаимодействия подсистем.*

***Ключевые слова:*** *модель, шлифование, диагностика, прогнозирование, эксперимент, алгоритм, сила резания, точность.*

*The complex model of operation of polishing, containing in the composition the models of separate subsystems and dependence, setting the laws of co-operation of subsystems, is offered.*

***Key words:*** *diagnostics, forecasting, technical system, instrument, model, grinding.*

**Постановка проблемы.** При шлифовании деталей в автоматизированном производстве на станках задаются режимы обработки и координатные перемещения режущего инструмента для выбранной номенклатуры деталей. Особенности же процессов обработки, связанные с разбросом параметров заготовки и влиянием возмущающих воздействий, как правило, не учитываются. Процесс шлифования характеризуется изменением не только взаимного расположения заготовки и инструмента, но и изменением параметров всей технологической системы.

**Анализ литературы.** Анализ работ [1–3] показал, что эффективная диагностика и управление процессом механической обработки возможны на основе новых подходов зависимостей между основными технологическими параметрами процесса резания (режимами обработки, геометрией инструмента, свойствами обрабатываемого и инструментального материалов и т. д.) и выходными параметрами. Полученная модель анализа процессов функционирования системы и обоснования методов ее исследования дополнена функционалами взаимодействия подсистем. Это позволяет провести проверку адекватности предложенной модели.

**Цель статьи** – решить комплекс задач, связанных с диагностикой и прогнозированием качества обработки и значений параметров состояния самой системы при различных вариантах изменения режимных параметров и других входных переменных и управляющих воздействий.

**Изложение основного материала.** Был поставлен численный эксперимент по расчету текущих значений параметров состояния системы и выходных переменных при четырех вариантах управления (табл. 1).

**Таблица 1.**

**Варианты управления процессом шлифования.**

| **№ варианта управления** | **Поперечная подача $S_1$, мм/мин** | **Скорость изделия $V_и$, м/с** | **Скорость круга $V_k$, м/с** |
|---|---|---|---|
| 1 | | 0,27 | 50 |
| 2 | | 0,4 | 52 |
| 3 | 0,4 | 0,4 | 35 |
| 4 | Меняется по циклу $S_1 = 0{,}4$; $S_2 = 0{,}15$ | 0,27 | 50 |

Расчеты выполнены для случая шлифования образцов из закаленной стали 40Х кругами ПП750×25×305 25А40С26К20 на круглошлифовальном станке повышенной точности.

На основе предложенной модели установлены следующие параметры начального состояния системы:

1) податливость технологической системы $\omega_c = 20\times10^{-9}$ м/Н (определена экспериментально);
2) число зерен на единице рабочей поверхности инструмента $n_з = 2\times10^6$ 1/м$^2$;
3) радиус закругления при вершине зерна $\rho_з = 0{,}016$ мм;
4) значения коэффициентов: $m = 0{,}5$;

$\chi = 1{,}5$; $\tau_s = 7{,}2\times10^3$ Н/м$^2$;
$K_c = 0{,}9$; $H_и = 10$ мкм (табл. 2).

**Таблица 2.**

**Основные зависимости модели круглого наружного врезного шлифования.**

| Система | Параметр | Зависимости модели |
|---|---|---|
| Система | Пространственное расположение подсистем | $\Delta t_{\phi j} + \Delta r_{j-1} + \Delta R_j + \Delta y_{ynj} + \Delta y_{\Theta} = \int_{t_{j-1}}^{t_j} S d\tau$ (1)<br>$y_{иi} = \frac{A_{кпрi}\sqrt{C_k^2 + G_k^2\omega_в}}{\sqrt{\left(\omega_с^2 - \omega_{вс}^2\right)^2 + 4n^2\omega_в^2}}\cos(\omega_в\tau + \psi_{прi} + \alpha - \lambda)$ (2) |
| | Выходные переменные | $З = С + EK$ (3) |
| Станок, приспособление для правки | Точность | $\delta_{с,пр} = \delta_{с,пр}(0) + [(k_с + k_{пр})\,\delta_ф - \delta_{с,пр}(0)]\frac{\tau}{T_c}$ (4) |
| | Жесткость | $\omega(t) = \frac{\omega(0)}{[R_{max}(0)]^\nu}\left[R_{max}(0) + \Delta R_{max}\cdot(1 - e^{-at})\right]^\nu$ (5) |
| Приспособление | Точность | $\delta_{п} = \delta_п(0) + \left(k_n - \delta_п(0)\right)\delta_ф\left(\frac{\tau - jT_n}{T_n}\right)$ (6) |
| Зона контакта | Глубина резания | $t_{\phi j} = R_j(\gamma, x) + r_{j-1}(\alpha, x) - A_{нj} - y_{ynj} - y_{\Theta j} - (y_{\omega к} - y_{\omega и})_j$ (7)<br>$t_A(z) = \bar{t}_{\phi i} - \frac{z^2}{D_э} + \sum_k A_{tk}\cos\left[\frac{\omega_{tk}(L+z)}{\nu_u} + \psi_{tk}\right]$ (8) |
| | Вероятность неудаления материала | $P(M) = 1 - e^{-(a_0 + a_1 + \ldots + a_k + \ldots + a_j)}$ (9)<br>$a_k = \begin{cases} G_k(t_{\phi k} - y_{k-1})^\nu, & t_{\phi k} > y_{k-1} \\ 0, & t_{\phi k} \le y_{k-1} \end{cases}$ (10)<br>$G_k = \frac{\Gamma(m+1)\Gamma(\chi)\chi K_с C_b\sqrt{\pi}(V_k \pm V_и)n_э\sqrt{D_э}}{\Gamma(m+\chi+1{,}5)V_и H_и^\nu}$ |
| | Координата уровня | $y_{j-1} = y_j + \Delta r_j;\ y_{j-2} = y_{j-1} + \Delta r_{j-1};\ y_{k-2} = y_k + \Delta r_k$ (11) |
| | Вероятность разрушения и вырывания зерна | $P(A) = \int_{-\infty}^{+\infty} f(q_э)\int_{q_э}^{\infty} f(r)\,dr\,dq_э$<br>$P(B) = \int_{-\infty}^{+\infty} f(q_{св})\int_{q_{св}}^{\infty} f(r)\,dr\,dq_{св}$ (12) |
| | Износ вершины зерна | $\Delta h_{зi} = h_0 L_{pi} = \int_{-L_э(t_{зi})}^{L_э(t_{зi})} h_0 P_k\,dz$ (13)<br>$P_k = P\left(\overline{M}\right)$<br>$h_э' = \int_{-L_э(t_э)}^{L_э(t_э)} h_0 P_k \nu_k\,dz$ (14) |

| | | |
|---|---|---|
| | | $t_{зi} = t_{зi-1} + \Delta R_{i-1} - \Delta h_{зi} - \Delta_{скi}$ (15) |
| | Радиальный съем материала | $\Delta r_j = t_{фj} - \left[\frac{-\ln\beta_м - a_0 - a_1 - \ldots - a_k - \ldots - a_{j-1}}{G_j}\right]^{1/v}$ (16) |
| | Силы резания | $P_y = \frac{\chi B_k n_з C_b h_{з\max}^m (t_ф - \Delta r)^{\chi+0,5}\sqrt{D_э}}{H_u^\chi}\tau_s \times$ $\times\left[0{,}96B(\chi; mz+3{,}5)(t_ф - \Delta r)\frac{\sin\beta}{\sin\beta_1} + \frac{\pi C_b h_{з\max}^m}{6}B(\chi; 2mz+2{,}5)\right]$ (17) $P_z = C_z P_y$ (18) |
| Абразивный инструмент | Форма режущих кромок | $\rho_з(\tau) = \frac{\rho_з(0)t_ф}{t_ф - h_з}$ (19) $l_з = 2\sqrt{2\rho_з(0)h_з}$ (20) $h_{зi} = h_{зi-1} + \Delta h_{зi}$ |
| | Число кромок | $n_з(\tau) = n_{зi} = \sum_k n_з \Delta\delta_{ki}$ $n_{з\Delta i} = n_{з\Delta i-1} - n_{з\Delta i-1}\left[P(Y>0) + P(Z>0)\right] + \int_{u_{нi}}^{u_{вi}} n_{pi} f_p(u)du$ (21) |
| | Плотность распределения | $f_{\varepsilon u\tau}(u) = \frac{n_з(0)}{n_з(\tau)} f_{\varepsilon u\tau}(u + \Delta R - h_з)(1 - Q_p)\frac{d(u + \Delta R - h_з)}{d(u + \Delta R)}$ (22) |
| | Размеры и форма рабочей поверхности | $R_i(yxz) = R_{i-1}(yxz) - \Delta R_i(yxz)$ (23) $R(\gamma,\tau) = \overline{R}(\tau) + (A_l + S_l\tau)\cos(l\gamma + \Psi_l) + \sum_{k=1}^{\infty}(A_k + S_k\tau)\cos(k\gamma + \Psi_k)$ (24) |
| Заготовка | Текущий радиус-вектор | $r_j(\alpha,x,z) = r_{j-1}(\alpha,x,z) - \Delta r_j(\alpha,x,z)$ (25) |
| | Эксцентриситет | $\varepsilon_i = r_{\max i} - r_{\min i} \approx \varepsilon_{i-1} - (\Delta r_{\max i} - \Delta r_{\min i})$ (26) |
| | Глубина дефектного слоя | $T = 2\sqrt{\alpha T_{кз}\frac{T_к - T_{сп}}{T_к}\ln\frac{T_к - T_{сп}}{2T_{сп}}}$ (27) |
| | Волнистость | $W = \max(r_{выс.k} - r_{вп.k})$, $k = 1, 2, 3, 4, 5$ (28) |
| | Шероховатость поверхности | $M[t_р] = \frac{1}{l}\int_0^l P(x)dx = P(\overline{M})$ (29) $R_a = 2\int_0^\infty t_р dy_m$ (30) |

Вычисления проводились по алгоритму, рассмотренному на рис. 1.

На первом этапе уточнялись значения входных переменных, для заготовки принято П = 0,5 мм; $\varepsilon_0$ = 0,1 мм; $W_0$ = 0, $H_0$ = 6,3 мкм. Изменения параметров станка и приспособления в процессе расчетов не учитывались.

На втором этапе проводился расчет параметров зоны контакта при первом контакте заготовки с инструментом. Для этого решалось уравнение методом итераций баланса перемещений. По геометрическим параметрам зоны, параметрам заготовки и параметрам инструмента определяли вероятность неудаления материа-

ла, вероятность вырывания и разрушения абразивных зерен, износ вершин зерен, радиальный съем материала, износ круга. Для оценки остаточного эксцентриситета расчеты проводили для двух сечений заготовки, имеющих наименьший и наибольший радиус-вектора.

На третьем этапе рассчитывали состояние поверхности инструмента после первого контакта заготовки с кругом, затем определяли параметры состояния заготовки. Волнистость, образующаяся на поверхности заготовки, рассчитывалась по дополнительному алгоритму. После завершения анализа первого оборота заготовки переходили к последовательному анализу второго, третьего и т. д. оборотов. Процедура вычислений заканчивалась при съеме с заготовки всего припуска. Циклы расчетов повторялись для второй, третьей и т. д. заготовок.

**Ошибка! Ошибка связи.**

**Рис. 1. Алгоритм расчета.**

В качестве критерия стойкости инструмента между правками принят допустимый радиальный износ круга $\Delta R_{max}$, $\Sigma_i \Delta R_i \le \Delta R_{max}$.

Расчетные данные по изменениям радиальной составляющей силы резания, радиального съема материала и величине слоя шероховатости поверхности для всех вариантов управления приведены на рис. 2, 3 и 4.

Для большей наглядности при построениях ломаные линии заменены на непрерывные. Для первых оборотов заготовки сила резания $P_y$ и съем $\Delta r$ минимальны. Вся подача расходуется на приращение глубины резания $t_ф$ и упругих деформаций.

**Ошибка! Ошибка связи.**

**Рис. 2. Изменение радиальной составляющей силы резания с изменением алгоритма управления и режима резания.**

Ошибка! Ошибка связи.

**Рис. 3. Изменение радиального съема материала при изменении алгоритма управления и режима резания.**

Ошибка! Ошибка связи.

**Рис. 4. Изменение шероховатости поверхности при изменении алгоритма управления и режима резания.**

При увеличении времени обработки наблюдается закономерное увеличение, которое продолжается до полного съема припуска с заготовки и вызывается как увеличением глубины резания, так и образованием на режущих кромках площадок износа. Радиальный съем материала сначала увеличивается, а затем несколько уменьшается в связи с затуплением режущих кромок и уменьшением их числа на рабочей поверхности инструмента. Зависимость шероховатости поверхности от времени обработки носит более сложный характер.

При первых оборотах заготовки наблюдается незначительное снижение исходной шероховатости поверхности, затем темп ее уменьшения увеличивается. После удаления исходной шероховатости наблюдается ее некоторая стабилизация, а затем увеличение, вызванное изменением состояния рабочей поверхности инструмента.

Для управления № 4 в момент изменения подачи наблюдается экспоненциальное снижение силы резания и радиального съема материала. На ход всех кривых существенно влияет скорость круга, при изменении скорости изделия параметры процесса изменяются незначительно. При обработке пятой заготовки (на рисунке не показано) характер всех кривых сохраняется, но изменяются численные значения параметров процесса.

Табл. 3 дает статическую оценку результатов прогнозирования выходных переменных при заданном интервале времени процесса шлифования.

**Таблица 3.**

**Расчетные значения показателей процесса шлифования образцов.**

| № | Режимы резания | | | | Режущая способность $Q_м$, мм³/с | Износ инструмента, мм³/с | Радиальная составляющая силы $P_y$, Н | Шероховатость поверхности $R_a$, мкм |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | Скорость круга $V_k$, м/с | Скорость заготовки $V_н$, м/с | Продольная подача $S_x$, м/с | Поперечная подача $S_t$, м/с | Расчетная | Расчетный | Расчетная | Расчетная |
| 1 | 35 | 0,66 | 16,6 | 0,133 | 27,2 | 1,96 | 145 | 1,17 |
| 2 | 20 | 0,33 | 16,6 | 0,133 | 27,2 | 2,32 | 210 | 1,57 |
| 3 | 20 | 0,66 | 8,3 | 0,133 | 27,2 | 2,32 | 220 | 1,54 |
| 4 | 20 | 0,66 | 16,6 | 0,066 | 13,6 | 0,68 | 134 | 1,08 |

| | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 5 | 35 | 0,33 | 8,3 | 0,133 | 27,2 | 2,10 | 137 | 1,20 |
| 6 | 35 | 0,33 | 16,6 | 0,066 | 13,6 | 0,60 | 90 | 0,85 |
| 7 | 35 | 0,66 | 8,3 | 0,066 | 13,6 | 0,70 | 87 | 0,83 |
| 8 | 20 | 0,33 | 8,3 | 0,066 | 13,6 | 0,61 | 130 | 1,10 |
| 9 | 27 | 0,50 | 12,5 | 0,100 | 20,4 | 1,19 | 142 | 1,10 |
| 10 | 27 | 0,50 | 12,5 | 0,100 | 20,4 | 1,19 | 142 | 1,10 |

**Выводы.**

1. Из анализа полученных зависимостей можно сделать вывод, что для процессов отработки с различными законами изменения управляющих воздействий нельзя выделить периоды, в течение которых процесс можно было бы считать установившимся, такой процесс не является характерным даже при условии постоянства режима резания.

2. Расчеты показывают, что приведенные модели достаточно полно описывают динамику операций шлифования и учитывают изменения, возникающие в технологической системе.

3. Дальнейшие исследования на основе предложенной модели будут направлены на проверку адекватности разработанной модели, сравнение экспериментальных значений выходных переменных операции шлифования с расчетными.

ЛИТЕРАТУРА


1. Новоселов Ю. К. Диагностика операций чистового шлифования / Ю. К. Новоселов, Э. Э. Ягьяев // Оптимизация производственных процессов : [сб. науч. тр.]. – Вып. 10. – Севастополь, 2007. – С. 52–56.
2. Ягьяев Э. Э. Влияние параметров технологической системы на выходные переменные операции шлифования / Э. Э. Ягьяев, Л. Б. Шрон, В. Б. Богуцкий // Прогрессивные направления развития машино-приборостроительных отраслей и транспорта : материалы Международной научно-технической конференции. – Севастополь, 2008. – С. 104–106.
3. Новоселов Ю. К. Нейросетевая информационная модель диагностики чистового шлифования / Ю. К. Новоселов, Э. Э. Ягьяев // Ученые записки Крымского инженерно-педагогического университета. Выпуск 11. Технические науки. – Симферополь, 2008. – С. 65–68.

УДК 621.791.039

**Якубов Д., Байрамов Р. С.**

# НАДЕЖНОСТЬ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ С УЧЕТОМ ЧЕЛОВЕЧЕСКОГО ФАКТОРА

*Дана стаття освітлює питання експлуатації технологічних систем, що забезпечують виготовлення різноманітних деталей, вузлів і машин в машинобудуванні з врахуванням впливу людського чинника.*

***Ключові слова:*** *надійність, станок, людина, взаємодія, професійна якість, продуктивність, безпека, охорона праці.*

*Данная статья освещает вопросы эксплуатации технологических систем, обеспечивающих изготовление различных деталей, узлов и машин в машиностроении с учетом влияния человеческого фактора.*

***Ключевые слова:*** *надежность, станок, человек, взаимодействие, профессиональное качество, безопасность, охрана труда, производительность.*

*This article lights up the questions of exploitation of the technological systems, providing making of different details, knots and machines are in an engineer taking into account influence of human factor.*

***Key words:*** *reliability, the machine tool, people, interaction, professional quality, productivity, safety, lab our safety.*

**Постановка проблемы.** Для эффективного управления охраной труда на машиностроительном предприятии необходимо научно обосновать роль человека в технологическом процессе изготовления деталей и узлов той или иной машины. Вопрос теоретического обоснования роли человека в технологии является актуальным, производственно значимым, так как позволяет решить качественные, производительные и экономические задачи применения системы «Технология – человек».

**Анализ литературы.** Наука об обработке материалов сделала очень многое для продления жизни технологической системы. Определены условия обработки, скорость, глубина, подача инструмента, смазывающая охлаждающая жид-

кость, жесткость и форма инструмента и т. п. На основе колоссального количества экспериментов определена надежность каждого элемента, участвующего в процессе обработки [1–4].

Однако в данных публикациях нет ни слова о роли человека в данном процессе. Поэтому, естественно, не возникало проблемы охраны труда исполнителя. Конструкторы создавали технику безопасности эксплуатации станков, но не учитывали причины и условия возникновения «опасных» отказов по вине человека.

**Цель работы** – создать теоретическую основу и методику расчета взаимодействия системы «Технология – человек», позволяющей прогнозировать чрезвычайные ситуации на предприятиях.

**Изложение основного материала.** Общий анализ выполненных исследовательских работ по регламентированию технологии обработки, например, на универсальных токарных станках в зависимости от условий реализации технологии, режимов обработки детали, материала детали, режущего инструмента и других факторов позволяет прогнозировать, управлять и контролировать применение производственной техники.

Отказы оборудования бывают внезапными и постепенными. При одновременном действии внезапных и постепенных отказов для технических средств вероятность выполнения требований технологии определяется теоремой умножения вероятностей [5]:

$$P(t) = P_{с}(t) \times P_{п}(t) \times P_{и}(t) \times P_{д}(t), \qquad (1)$$

где $P_{с}(t)$ – безотказная работа станка;
$P_{п}(t)$ – безотказная работа приспособления;
$P_{и}(t)$ – безотказная работа инструмента;
$P_{д}(t)$ – безотказная работа материала детали.

При известных параметрах законов распределения $T$, $\sigma$, $\lambda$ можно рассчитать вероятность безотказной реализации заданной технологии, где $T$ – математическое ожидание; $\sigma$ – стандартное отклонение; $\lambda$ – интенсивность отказов.

Ситуация существенно изменится, если в систему технологии для расчета вероятности выполнения требований технологии ввести элемент «человек». Назначение этого элемента – рациональное выполнение техническими средствами функциональных задач, обеспечивающих заданный технологический процесс. Одновременно человек, с позиции технологии, – это управляющая, саморазвивающаяся система, имеющая свою индивидуальную возможность воздействия на технические средства, способная изменять показатели надежности процесса обработки изделия. Присутствие человека требует в первую очередь обеспечения его безопасности, сохранения здоровья, создания нормальных санитарно-гигиенических условий труда и т. д., то есть решить комплекс мероприятий по охране труда.

Если в первом случае показатели надежности в известной степени стандартизованы, что позволяет своевременно прогнозировать и устранять влияние постепенных отказов на действие оборудования, при выполнении технологического процесса с включением в процесс человека возникает значительная сложность решения задачи надежности комплекса системы «Технология – человек».

Отметим, что без участия человека современные технические средства успешно могут изготавливать требуемую деталь или изделие, но этот процесс экономически обоснован при массовом производстве из-за высокой стоимости управляющих устройств. Кроме этого, автоматические станки не контролируют, не совершенствуют процессы обработки, они исполняют заданную человеком программу, причем достаточно часто постепенные отказы приводят к браку на производстве. Человек за станком – это исполнитель, контролер, наблюдатель действий системы «Станок – приспособление – инструмент – деталь» (СПИД).

В наших рассуждениях мы максимально сократили число факторов, определяющих надежность технологии. Фактически в каждом из элементов системы СПИД участвует множество вторичных факторов. Они изменяют рациональную составляющую первичного фактора, например, справочные данные по скорости, подаче, глубине резания, полученные для определенных свойств СОЖ, материала заготовки, материала инструмента и т. п. – производства прошлого века.

Сегодня мы приобретаем подшипники в Европе, везем материал из Китая, инструмент – из Польши и т. д., а это существенно влияет на надежность системы СПИД. При такой ситуации функционирование в процессе человека становится особенно необходимым, так как на него возлагается ещё и обязанность управления технологической системой с задачей постоянной оценки состояния СПИД и предотвращения внеплановых отказов. От решения этой задачи всецело зависит собственная безопасность элемента системы СПИД – человек, его целостность, здоровье, эффективность действий, производительность труда, стабильность техпроцесса, а следовательно, охрана труда исполнителя.

Таким образом, человек в технологическом процессе производства оказывается главным действующим лицом, а машины и механизмы – исполняющими его команды. Значит, от того, как поведет себя человек, всецело зависит результат действия машин. Возникает вопрос о

том, от чего зависит производственная деятельность человека и, в зависимости от этого, надежность технологического процесса.

Правильно определив характеристические свойства человека, научив его действиям, повышающим технологическую надежность оборудования, добившись стабильности его психофизиологического состояния, можно обеспечить результативность действия технологии и охрану труда работающего. Важно найти метод выражения способности человека в цифровом (кодовом) виде, приемлемый для обработки на компьютере. Если учесть что технические средства решают задачу усиления мощности человека, увеличения скорости обработки, снижения напряжения двигательных и зрительных нагрузок, можно уверенно не принимать во внимание физическое состояние исполнителя, его рост, комплекцию и другие характеристики.

Современные методы определения способностей человека методами тестирования позволяют изначально определить возможности и склонности человека выполнять те или иные функции, однако они требуют создания специальных тестов по конкретным профессиям и достаточно сложны в обработке.

В то же время известно, что при работе с техническими средствами человек испытывает усталость, у него могут возникнуть болевые ощущения в мышцах, суставах, притупиться острота внимания (монотонные процессы), зрения (изготовление деталей высокой точности). Эти факторы могут постепенно привести к сбоям в работе человека, поэтому их отнесли к внезапным отказам.

Все перечисленные факторы хорошо описываются экспоненциальными зависимостями, причем, как показали эксперименты, они взаимно коррелируют с коэффициентами больше 0,70–0,9 [6].

Факторы, подобные реакции на останов механической подачи инструмента, фиксации изменений звуковых характеристик действия пары «деталь – инструмент», реализация на практике профессиональной подготовки обучающих действий, уровень приобретения профессиональных навыков взаимодействия с системой СПИД описываются нормальными законами распределения.

Однофакторные изменения надежности технологической системы, например, профессиональное обучение человека, конкретного субъекта, запишется так:

$$f(x) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \times e^{1/2[(x-\xi)/\sigma]^2}, \qquad (2)$$

где $\xi$ – центр распределения.

Плотность нормального распределения:

$$\Phi(x) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^{x} e^{\frac{1}{2}(\frac{x-\xi}{\sigma})^2} dx \equiv$$

$$\equiv \Phi_u\left(\frac{x-\xi}{\sigma}\right) \equiv \frac{1}{2}\left[1 + r + f\left(\frac{x-\xi}{\sigma\sqrt{2}}\right)\right], \qquad (3)$$

где $u = \dfrac{x-\xi}{\sigma}$.

Однако в нашем случае рассматриваются несколько характеристик человека, участвующих в реализации технологического процесса, обеспечивающих его надежность, поэтому необходимо исследовать несколько нормальных распределений одновременно.

Известно, что функция плотности нормального распределения от $N$ факторов определяется выражением [7]:

$$f(x) = (2\pi)^{-\frac{N}{2}} (\det \Sigma)^{-\frac{1}{2}} \times$$

$$\times \exp\left\{-\frac{1}{2}\left[(x-\mu), \Sigma^{-1}(x-\mu)\right]\right\}, \qquad (4)$$

где $\mu$ – $N$ вектор математических ожиданий факторов $x_1, x_2, \ldots x_N$;

$\sum$ – матрица размером $N \times N$ (ковариационная матрица популяций);

(,) – обозначение скалярного произведения.

Зависимость (4) можно представить как

$$f(x) = \text{const} \times \exp. \qquad (5)$$

Если предположить, что среди различных характеристик человека, управляющего системой СПИД, существуют стандартные свойства, причем каждая имеет нормальную функцию плотности (4), и матрица положительно определена, а все нормальные функции, среди которых производится дискриминация, имеют одну и ту же матрицу, то задача значительно упрощается. Определения разряда, к которому должно быть отнесено выборочное значение $x$, проверяется условием – выполняется ли неравенство:

$$f_i(x_i) > f_j(x_j). \qquad (6)$$

Если воспользоваться зависимостью (4) для случая, когда $\sum$ для $i, j$ одинаковы, то (6) принимает вид:

$$-[(x - \mu^{(i)}), \Sigma^{-1}(x - \mu^{(i)})] >$$

$$> -[(x - \mu^{(j)}), \Sigma^{-1}(x - \mu^{(j)})], \qquad (7)$$

где $i, j$ – индексы принадлежности субъектов к различным уровням профессиональной подготовки (разрядам).

Раскрывая скобки в скалярных произведениях обоих частей неравенства (7) и сокращая общие члены, находим:

$$(x, \Sigma^{-1}\mu^{(i)}) - \tfrac{1}{2}(\mu^{(i)}, \Sigma^{-1}\mu^{(i)}) >$$

$$> (x, \Sigma^{-1}\mu^{(j)}) - \tfrac{1}{2}(\mu^{(j)}, \Sigma^{-1}\mu^{(j)}). \qquad (8)$$

Введем обозначения:

$v^{(i)} = \sum^{-1}\mu^{(i)}$, $i = 1, \ldots m$; $v^{(j)} = \sum^{-1}\mu^{(j)} j = 1 \ldots n$,

$\lambda_i = ½(\mu^{(i)}, \sum^{-1} \mu^{(i)})$, $i = 1, \ldots m$; $\lambda_j = ½(\mu^{(j)}, \sum^{-1}\mu^{(j)}) j = 1, \ldots n$.

Тогда неравенство принимает вид:

$$(x, v^{(i)}) - \lambda_i > (x, v^{(j)}) - \lambda_j, \qquad (9)$$

из которого следует, что выбранное значение фактора $X$ относится к разряду с индексом ($i$), для которого максимальной является линейная функция:

$$h_i(x) = (x, v^{(i)}) - \lambda_i. \qquad (10)$$

Полученная зависимость (10) – линейная дискриминантная функция Фишера – значительно проще квадратичной формы (4).

Реализация полученных теоретических результатов на основании того, что факторы, влияющие на надежность СПИД, имеют взаимную корреляцию, близкую к единице, с учетом включения человеческого фактора возможна в натуральных величинах, например, с учетом стандартной профессиональной квалификационной оценки – разряда.

Тогда функция, характеризующая роль человека в технологическом процессе, включая его психофизиологические возможности, состояние здоровья (в целом), запишется:

$$f(Ч_i) = РФ_i \times З_i \times (О_i + ПП_i), \qquad (11)$$

где $РФ_i$ – психофизиологические данные исполнителя (%);

$З_i$ – здоровье исполнителя (%);

$О_i$ – профессиональное обучение, например, на базе школы, принимаемая для расчетов как постоянная величина – надежность 50% (нет допуска для самостоятельной работы на производстве);

$ПП_i$ – уровень профессиональной подготовки, например, разряд.

Если считать, что $РФ_i$, $З_i$, $О_i$ – вполне определенные значения, то их произведение, очевидно, будет показателем масштаба функции, описываемой зависимостью (2) с плотностью распределения (3), которая полностью описывается (10), тогда с учетом временного фактора можно записать:

$$P(t) = P_с(t) \times P_п(t) \times P_и(t) \times P_д(t) \times P_ч(t). \qquad (12)$$

Принимая во внимание, что показатели надежности СПИД вполне конкретны, производствами выполняются требования, обеспечивающие их нормальное функционирование, необходимо дать возможность применить $P_ч(t)$ в расчетах. Для этого предлагается использовать в первом приближении следующую шкалу профессиональной надежности исполнителя – человека:

1 разряд – 8 баллов – 58% надежности;
2 разряд – 7 баллов – 65% надежности (имеет допуск к самостоятельной работе на технологическом оборудовании);
3 разряд – 7баллов – 72% надежности;
4 разряд – 6 баллов – 78% надежности;
5 разряд – 6 баллов – 84% надежности;
6 разряд – 6 баллов – 90% надежности;
7 разряд – 6 баллов – 96% надежности.

Несложно посчитать, что, если у исполнителя $РФ_i$ составляет только 60%, а здоровье его в сравнении со «здоровым» его состоянием, например, 85%, то надежность его действий управлять, оценивать состояние техники, предупреждать отказы составит для второразрядника 33%, а для специалиста седьмого разряда – только 49%.

Как видим, ни тот, ни другой, в принципе, не могут быть допущены к работе с техническими средствами.

Рассмотрим расчет надежности системы «СПИД + человек» при $P_с = 0{,}95$, $P_п = 0{,}95$, $P_и = 0{,}95$, $P_д = 0{,}95$, а человеческий фактор – второго и седьмого разрядов. Надежность системы СПИД составит 0,82 (82%), с участием исполнителя второго разряда $P(t) = 0{,}53$ (53%), а с исполнителем седьмого разряда $P(t) = 0{,}78$ (78%). Надежность последней системы почти на 50% выше, чем показатель с исполнителем второго разряда.

Расчеты показывают, что обучение и совершенствование профессиональных навыков и приемов исполнителей не только положительно влияют на качество, производительность, надежность технологических систем, но и решают вопросы охраны труда, так как снижение отказов – это прямое предупреждение несчастных случаев на производстве. Полученные результаты не учитывают влияния практических навыков (тренировки) в управлении технологическим процессом, что, по нашему мнению, существенно может изменить показатель $РФ_i$ в большую сторону. Системный подход к вопросу повышения надежности технологии с участием человека позволит определить пути развития высоконадежных процессов при здоровом и защищенном труде человека.

**Выводы.**

1. Предложенная методика расчета надежности технических средств в технологических процессах с учетом роли человека в них позволяет создать теоретическую модель, определяющую условия и безопасность труда исполнителя, степень влияния его на технические и экономические показатели труда, роль профессиональной подготовки на безопасность труда.

2. Полученная модель расчета надежности

системы «Технология – человек» позволит рационализировать действия в управлении охраной труда, прогнозировать ситуацию отказов и возникновения условий труда, опасных для работающего, предупредить несчастные случаи на производстве.

3. Дальнейшее совершенствование предлагаемой модели предусматривает сбор статистической информации по отказам на производствах по системе СПИД и составляющим функции «человеческий фактор».

ЛИТЕРАТУРА


1. Граневский Г. И. Резание металлов / Г. И. Граневский. – М. : Высшая школа, 1985. – 304 с.
2. Лоладзе Т. Н. Износ режущего инструмента / Т. Н. Лоладзе. – М., 1958. – 436 с.
3. Резников А. Н. Теплофизика резания / А. Н. Резников. – М., 1969. – 420 с.
4. Трент Е. Резание металлов / Е. Трент ; [пер. с англ.]. – М., 1980. – 387 с.
5. Гнеденко Б. П. Математические методы в теории надежности / Б. П. Гнеденко. – М. : Наука, 1965. – 524 с.
6. Мирошниченко Г. И. Основы проектирования машин первичной обработки хлопка / Г. И. Мирошниченко. – М. : Машиностроение, 1972. – 486 с.
7. Эйслен К. Статистические методы для ЭВМ / К. Эйслен, Э. Рэлсток, Г. С. Уилф ; [пер. с англ.] / под ред. М. Б. Мамонтова. – М. : Наука, 1986. – 428 с.

УДК 629.114.2

**Болдовский В. Н., Клец Д. М.**

# РАЗРАБОТКА СИСТЕМЫ КОНТРОЛЯ УСКОРЕНИЙ ТЯГОВО-ТРАНСПОРТНЫХ СРЕДСТВ

*Розроблена контрольно-сигнальна система, за допомогою якої можна визначати нормальні та граничні прискорення тяглово-транспортних засобів при його русі по різним опорним поверхням. Використання контрольно-сигнальної системи дозволить відслідковувати під час руху рівень прискорень та в випадку недопустимо великих прискорень видавати звукові сигнали. Дослідні роботи проводилися на колісному тяглово-транспортному засобі.*

***Ключові слова:*** *прискорення, контрольно-сигнальна система, тяглово-транспортний засіб, опорна поверхня.*

*Разработана контрольно-сигнальная система, при помощи которой можно определять нормальные и предельные ускорения тягово-транспортных средств при его движении по различным опорным поверхностям. Использование контрольно-сигнальной системы позволит отслеживать во время движения уровень ускорений и в случае недопустимо больших ускорений подавать звуковые сигналы. Исследовательские работы выполнялись на колесном тягово-транспортном средстве.*

***Ключевые слова:*** *ускорения, контрольно-сигнальная система, тягово-транспортное средство, опорная поверхность.*

*The control-signal system by means of which it is possible to define normal and limiting accelerations of wheel-vehicles at its movement on the various basic groundings is developed. Use of a control-signal system will allow to trace a level of accelerations during movement and in a case is inadmissible big accelerations to submit sound signals. Research works were carried out on a wheel-vehicle.*

***Keywords:*** *acceleration, control-signal system, wheel-vehicle, surface.*

**Постановка проблемы.** Эксплуатация тягово-транспортных средств по различным опорным поверхностям (твердое покрытие, грунтовая дорога и т. п.) сопровождается колебаниями в продольной, боковой и вертикальной плоскостях. Эти колебания вызваны неровностями профиля, высота которых может значительно изменяться. Величина и частота возникновения колебаний влияет на работу как отдельных узлов и механизмов, так и всего тягово-транспортного средства. В процессе движения по дороге с хорошим покрытием или с незначительными неровностями все возникающие колебания воспринимаются, «гасятся» ходовой системой и элементами подвески.

При движении по неровной дороге величина колебаний увеличивается, и работа ходовой системы и подвески ухудшается, вследствие этого на детали и механизмы тягово-транспортного средства действуют нагрузки, которые часто превышают допустимые, при этом происходят перегрузки деталей трансмиссии, что в конечном итоге приводит к частым поломкам и соответственно к дополнительным денежным затратам [1].

Поэтому вопросам, связанным с контролем величин колебаний необходимо уделять достаточное внимание.

**Анализ последних достижений и публикаций.** Влияниям величин колебаний тягово-транспортных средств на нагрузки, возникающих в деталях трансмиссии, посвящены работы [1, 2].

Динамические нагрузки в трансмиссии в определенной степени зависят от типа и состояния дорожного покрытия. Движение по грунтовым поверхностям вызывает значительные вертикальные колебания. В зависимости от высоты неровностей профиля дороги изменяются условия работы и движения тягово-транспортного средства. Особенности таких режимов рассмотрены в работе [3].

В последних опубликованных работах в основном исследуется влияние профиля дороги на управляемость и устойчивость тягово-транспортного средства [2].

**Целью исследования** является разработка контрольно-сигнальной системы, с помощью которой обеспечивается отслеживание величин продольных, боковых и вертикальных ускорений тягово-транспортного средства при движении по неровной поверхности.

**Изложение основного материала.** Для определения продольных, боковых и вертикальных ускорений тягово-транспортного средства, возникающих при его движении, была разрабо-

тана контрольно-сигнальная система, состоящая из двух измерительных блоков.

В первый блок входит датчик вертикальных ускорений 1, подключенный к контрольно-сигнальному прибору 2 (общий вид этих элементов и их расположение в кабине тягово-транспортного средства представлены на рис. 1).

**Рис. 1. Расположение измерительной системы в кабине тягово-транспортного средства: 1 – датчик ускорения; 2 – контрольно-сигнальный прибор.**

Контрольно-сигнальный прибор размещается на панели приборов (рис. 2), его назначение и функции – регистрация входных сигналов от датчика ускорений и их обработка встроенным вычислительным микропроцессором.

**Рис. 2. Расположение контрольно-сигнальной системы на панели приборов.**

Входящие сигналы обрабатываются микропроцессором, результаты этого вычисления представляются на индикаторную шкалу в виде загорания светового индикатора различного цвета. Индикаторная шкала состоит из последовательно расположенных индикаторов различного цвета (зеленый, желтый, красный). Загорание индикатора определенного цвета происходит в зависимости от величины вертикальных ускорений, зеленый цвет соответствует минимальным значениям вертикальных ускорений, желтый – средним, красный – превышающим допустимое значение.

Контрольно-сигнальный прибор помимо цветовой индикации может выдавать звуковой сигнал при величине ускорений, превышающих допустимые значения.

Во второй блок входят два датчика ускорений и регистрирующая аппаратура (ноутбук).

Все экспериментальные исследования выполнялись на тягово-транспортном средстве, общий вид которого показан на рис. 3.

**Рис. 3. Тягово-транспортное средство, используемое при экспериментальных исследованиях.**

Подготовка к проведению экспериментальных исследований состояла из следующих этапов:

- устанавливались датчики ускорений на передний и задний мосты тягово-транспортного средства, настраивалась регистрационная аппаратура (ноутбук); размещение и способ закрепления датчиков представлены на рис. 4 и 5;
- в кабине располагали контрольно-сигнальный прибор и закрепляли датчик ускорения на каркасе кабины.

**Рис. 4. Установка датчика ускорения на передний мост.**

**Рис. 5. Установка датчика ускорения на задний мост.**

Во время проведения экспериментальных исследований тягово-транспортное средство перемещалось прямолинейно по участку неровной грунтовой опорной поверхности. При движении тягово-транспортного средства датчиками и приборами контрольно-сигнальной системы регистрировались и обрабатывались входные сигналы продольных, боковых и вертикальных ускорений. Результаты полученных данных представлены на рис. 6.

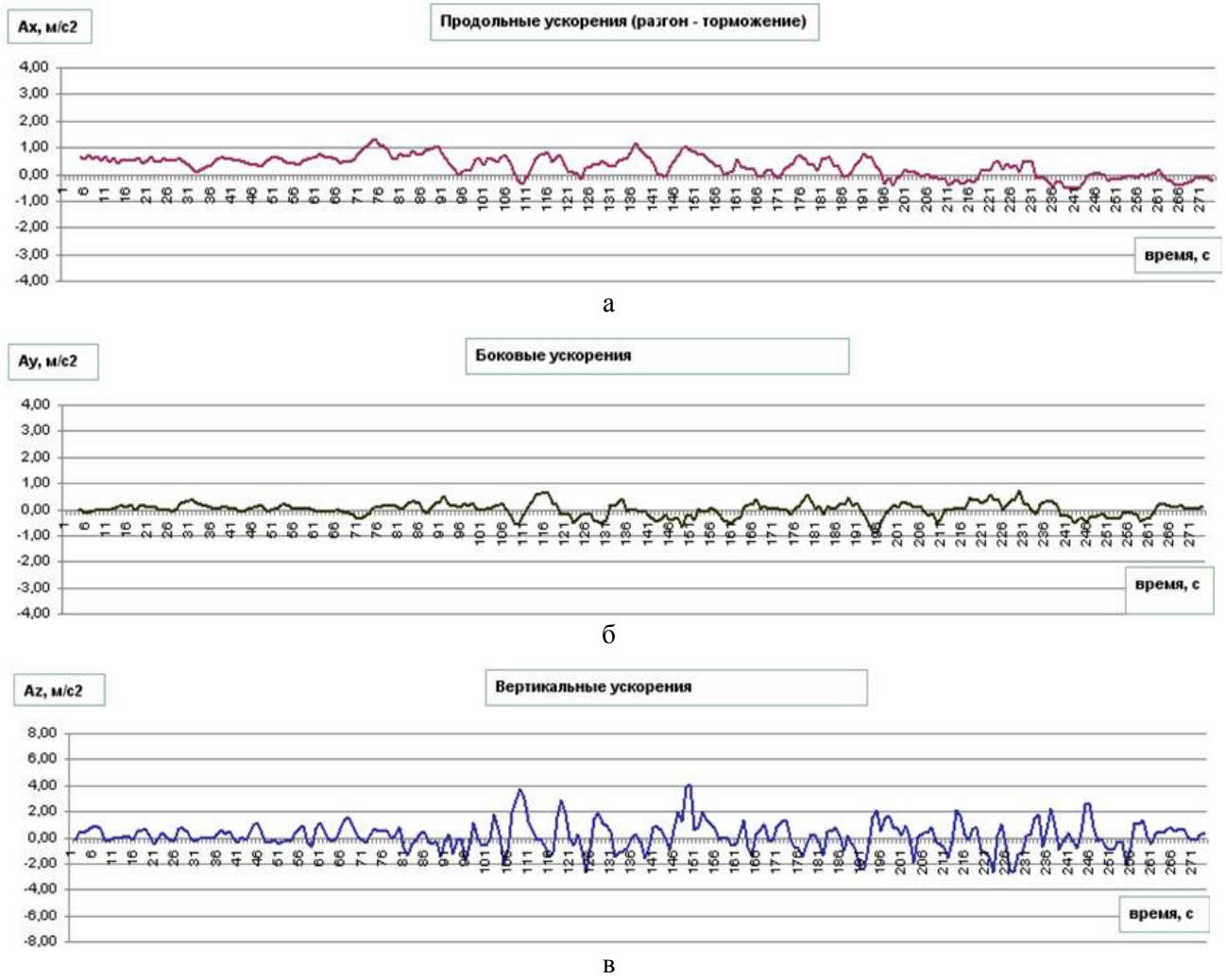



**Рис. 6. Изменение продольных, боковых и вертикальных колебаний при движении по деформируемой опорной поверхности: а – продольные ускорения; б – боковые ускорения; в – вертикальные ускорения.**

Анализ полученных экспериментальных данных показывает, что величины продольных и боковых ускорений тягово-транспортного средства при движении по неровной поверхности составляют от 0,2 до 1 м/с$^2$, в то время как вертикальные ускорения могут изменяться от 0,3 до 4,0 м/с$^2$. Загорание индикатора красного цвета и подача звукового сигнала свидетельствуют оператору о необходимости снижения скорости движения и изменения режима работы тягово-транспортного средства.

Разработанная контрольно-сигнальная система позволяет не допустить движение тягово-транспортного средства, когда его ускорения будут больше допустимых, что в конечном итоге позволит снизить динамические нагрузки на детали трансмиссии, а также повысить срок их службы.

**Выводы.**

1. Разработанная контрольно-сигнальная система позволяет измерять величины продольных, боковых и вертикальных ускорений тягово-транспортного средства.

2. Экспериментальным путем определены закономерности изменения ускорений тягово-транспортного средства при движении его по неровной грунтовой поверхности.

ЛИТЕРАТУРА

1. Смирнов Г. А. Теория движения колёсных машин / Г. А. Смирнов. – М. : Машиностроение, 1990. – 352 с.
2. Певзнер Я. М. Теория устойчивости автомобиля / Я. М. Певзнер. – М. : Машгиз, 1947. – 156 с.
3. Гаврилов Э. В. Принципы работы мобильных вычислительных комплексов / Э. В. Гаврилов, О. П. Алексеев, О. П. Смирнов // Информационные технологии. – Харьков : Магдебург, 1999. – С. 139–141.

УДК 629.113

**Подзноев Г. П., Абдулгазис У. А.**

# ВОЗМОЖНОСТИ ПОВЫШЕНИЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ Н-ДИЗЕЛЯ НА ОСНОВЕ АЛЮМОГИДРИДА С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ПЕРГИДРОЛЯ

*В статті надане обґрунтування заміни повітря для згорання водню пергідролем в циклі Н-Дизеля. Шляхом математичних розрахунків і моделювання визначені найбільш оптимальні діапазони змінення параметричних характеристик циклу в залежності від кількості добавленої води на гідроліз, регенерованої теплоти для умов виконання роботи, адекватної традиційному Дизелю. Показана балансова структура теплоти, що вводиться в цикл, визначені найбільш оптимальні співвідношення параметрів і принципові переваги Н-Дизеля.*

***Ключові слова:*** *термодинаміка ДВЗ, альтернативний енергоносій, пергідроль, дисоціація, гідроліз, математичне моделювання, оптимізація параметрів.*

*В статье представлено обоснование замены воздуха для сгорания водорода пергидролем в цикле Н-Дизеля. Путем математических расчетов и моделирования определены наиболее оптимальные диапазоны изменения параметрических характеристик цикла в зависимости от количества добавочной воды на гидролиз, регенерируемой теплоты для условий выполнения работы, адекватной традиционному Дизелю. Показана балансовая структура вводимой в цикл теплоты, определен наиболее оптимальный вариант соотношения параметров и отмечены принципиальные преимущества Н-Дизеля.*

***Ключевые слова:*** *термодинамика ДВС, альтернативный энергоноситель, гидрид алюминия, пергидроль, диссоциация, гидролиз, математическое моделирование, оптимизация параметров.*

*It is substantiated in this article that the air may be substituted by perhydrole for burning hydrogen in H-Diesel cycle. By means of mathematical calculations and modeling the most optimum range of parametric characteristics change of the cycle is stated depending on the amount of additional water for hydrolysis, regenerated heat for working conditions adequate to traditional Diesel.*

***Key words:*** *engine thermodynamics, alternative energy carrier, hydride aluminum, perhydrole, dissociation, hydrolysis, mathematical modelling, optimization of parameters.*

**Постановка проблемы.** Определяющим аспектом современной проблемы энергетической сферы является ограниченность и конечность природных ресурсов углеводородного сырья в недрах, которые не могут быть возобновлены в изначальном виде. Из этого следует, что в ближайшей перспективе (50–70 лет) должна быть найдена и технически обеспечена адекватная энергетическая альтернатива углеводородам, что и предопределило бурную активизацию исследований по разработке технологий альтернативного энергообеспечения транспорта.

**Анализ литературы.** По данным интернет-сайтов [1–3] практически все энергетические корпорации вкладывают огромные средства в престижные водородные программы. Водород привлекает внимание высокой энергией сгорания (120 МДж/кг), неисчерпаемостью своих природных ресурсов, неограниченной возобновляемостью и безупречной экологичностью в едином природном кругообороте в системе «вода → (водород + кислород) → вода».

Как топливо водород в разработанных на настоящий момент автомобильных двигателях используется в двух принципиально различных вариантах: в топливных элементах, вырабатывающих электроэнергию для питания электродвигателей, или непосредственно в двигателях внутреннего сгорания карбюраторного типа. В последнем случае (BMW 750hL) [4] преимущество состоит в том, что двигатели могут работать на любом из двух видов топлива – и на бензине, и на водороде, позволяя эффективнее использовать существующую производственную и коммуникационную инфраструктуру. Работая в водородном режиме, двигатель этой модели развивает мощность в 260 л. с. Водородный бак вмещает около 8 кг сжиженного водорода, отдельный бензиновый бак имеет объем 74 л.

Фирма «Ford» [5] установила на модели Focus C-MAX водородный ДВС ($H_2$ ICE). В качестве основы был использован трехлитровый четырехцилиндровый 110-сильный (82 кВт) бензиновый двигатель. Сжатый водород размещался под давлением 350 бар в трех баках общим объемом 119 литров (2,75 кг), что позволяло автомобилю пройти 200 км. Более эффективными считаются водородные системы с топливными элементами (ТЭ) с вдвое большим КПД, что обеспечивает и больший пробег.

GM [6] оснастила модель Chevrolet Equinox Fuel Cell мощными электромоторами и никель-металлогидридными тяговыми аккумуляторами, заряжаемыми от топливных элементов мощно-

стью 93 кВт. Водород хранится в углепластиковых баллонах под давлением до 700 атм. Одной заправки Equinox Fuel Cell (а это всего 4,2 килограмма водорода) хватает на 320 км пробега. Аналогично сконструированы модели Honda Civic FCX и DM Hy-Wire с водородом, помещенным в специальные сверхпрочные баллоны объемом 150–160 дм$^3$ под давлением 35 МПа. Масса $H_2$ при этом составляет всего 4,5–4,9 кг (570 МДж), способных обеспечить всего 400–450 км пробега.

Как следует из приведенного краткого обзора, водород прочно входит в приоритеты концепции развития технологии автомобильного производства.

В то же время водород как энергоноситель, несмотря на свои теплотехнические и экологические преимущества, обладает весьма серьезными проблемными характеристиками, трудноразрешимыми в разработанных концепциях водородных автомобилей. Самая серьезная из них – емкость топливного бака. Водород имеет весьма низкую объемную энергоемкость и плотность. Поэтому для его хранения и перевозки необходимо поддерживать высокое давление или весьма низкие температуры, что требует очень прочной и надежной тары. Кроме этого, газообразный водород весьма взрывоопасен при смешивании с кислородом воздуха, и наличие под сиденьем его сжатого до 35 МПа заряда (4–5 кг) с взрывным потенциалом около 90 кг в тротиловом эквиваленте создаст серьезные технологические и психологические проблемы его транспортировки, хранения и эксплуатации в автомобиле в современном весьма неуравновешенном мире.

Более перспективным может быть использование рада комплексных металлогидридов, особенно на основе гидрида алюминия ($AlH_3$), в условном адекватном объеме которого (150 дм$^3$) содержится 22,2 кг водорода с энергопотенцией около 2665 МДж [7]. Наибольший энерговыход получается при гидролизе $AlH_3$. В этом случае из его указанного объема в 150 дм$^3$ $AlH_3$ можно получить 44,4 кг газообразного $H_2$ с энергопотенцией уже 5330 МДж, что выше таковой для 150 дм$^3$ бензина (5060 МДж). Кроме этого при гидролизе выделяется значительное количество тепловой энергии (13,2 МДж/кг $AlH_3$, или около 2918 МДж в варианте 150 дм$^3$ $AlH_3$).

Таким образом, полный энергопотенциал $AlH_3$ может достигать 8250 МДж, что в 1,6 раза выше адекватного по объему бензина или в 15,3 раза выше, чем для сжатого до 35 МПа водорода [7].

В работе [8] рассмотрен идеальный термодинамический цикл концепт-автомобиля на основе гидрида алюминия (Н-Дизель), в который перед адиабатным сжатием введен предварительный процесс гидролиза $AlH_3$ оборотной водой, получаемой при конденсации пара отходящих газов. Оборотная вода к тому же используется для регенерации теплоты отработанных газов, приближая цикл Н-Дизеля к регенеративному циклу Карно.

Математическое моделирование основных термодинамических характеристик и параметров идеального цикла показывает значительное увеличение количества полезной работы при адекватности количества вводимой теплоты и термического КПД цикла, но при более мягких параметрических состояниях рабочего тела в цилиндре [9].

В то же время одна особенность Н-Дизеля существенно снижает его эффективную работу. Суть проблемы заключается в том, что, в отличие от традиционного дизеля, на стадию адиабатного сжатия здесь подается не воздух, а пароводородная смесь. При этом достигается достаточно высокое давление.

Следовательно, воздух, нагнетаемый в последующий процесс изобарного сгорания, должен подаваться под значительно более высоким давлением, чем созданное в камере сгорания, что потребует повышенных энергетических затрат на компрессию воздуха, почти на порядок превышающих таковые для нагнетания жидкого дизтоплива.

**Цель данной статьи** – описание результатов упрощенного моделирования и оптимизации основных характеристик идеализированного ре параметрических генеративного цикла Н-Дизеля с пергидрольным источником кислорода и их адекватности традиционному циклу Дизеля.

**Изложение основного материала.** Решением проблемы в отмеченном плане может быть концептуальная замена газового (воздушного) окислителя жидким, например, пергидролем ($H_2O_2$).

Чистый пергидроль (перекись водорода) почти в полтора раза тяжелее воды (плотность при 20ºС равна 1,45 г/см$^3$). Замерзает $H_2O_2$ при температуре немного меньшей, чем температура замерзания воды – при минус 0,41°С. Водные растворы $H_2O_2$ замерзают при значительно более низкой температуре: 30%-ный раствор – при минус 30°С, а 60%-ный – при минус 53°С. Кипит $H_2O_2$ при более высокой температуре (150,2°С), чем обычная вода. Вязкость у $H_2O_2$ такая же, как и у охлажденной, примерно до 13°С воды.

Содержание активного кислорода в пергидроле составляет 47%, т. е. значительно выше такового для других веществ. То, что перекись яв-

ляется жидкостью и может оставаться ею в водных растворах при температуре до минус 50°С, обеспечивает легкость ее транспортировки и эксплуатации в различных сезонных условиях, подачи в систему впрыска, простоту регулировки процесса горения и возможность управляемой его остановки.

Перекись водорода не взрывается и не детонирует при ударе, нагревании или под действием механических импульсов, что весьма важно в условиях предполагаемого использования в автомобиле. Однако присутствие различных примесей (пыли, ржавчины, щелочи, древесины, ткани и т. п.) создают опасность ее взрывоподобного разложения.

Пергидроль не токсичен, но при контакте с кожей вызывает легкие ожоги и требует внимательного и осторожного обращения.

При нагревании, а также под действием ультрафиолетового излучения и в присутствии ионов переходных металлов и серебра пергидроль разлагается на кислород и воду. При этом выделяется 2,9 МДж/кг теплоты (720 К), что является дополнительным (около 13%) источником энергии, позволяющим снизить расход основного топлива.

При термическом разложении получается in situ кислород как окислитель топлива. Причем в момент выделения он образуется в атомарной форме, что значительно улучшает кинетику и полноту горения основного топлива.

Еще в 1934 г. немецкий инженер Гельмут Вальтер [10] продемонстрировал паровую турбину, работающую с использованием пергидроля, при каталитическом разложении которого образуется кислород и перегретый (до 930°С) пар. Это позволило использовать полученную смесь для воспламенения нефтяного топлива в газовой турбине.

Учитывая вышесказанное, представляется целесообразным в определенной мере реанимировать идею Вальтера и заменить воздух как окислитель топлива в камере сгорания Н-Дизеля на жидкий пергидроль. В этом случае при термической диссоциации в среде высоконагретой в процессе гидролиза паро-водородной смеси образуются обычная вода и частично атомизированный кислород. Последний с повышенным тепловым эффектом сжигает водород, в результате чего образуется водяной пар.

Таким образом, единственным продуктом всего процесса и рабочим телом такого двигателя становится парообразная вода, что превращает дизель в своего рода паровой двигатель с системой регенерации питательной воды и отходящей теплоты, условно именуемой как Н-Дизель. Кроме этого, использование пергидроля как жидкости значительно упрощает его подачу в камеру сгорания и снимает проблему чрезмерно высоких энергозатрат в варианте использования кислорода воздуха.

Упрощенное моделирование проводилось по стандартной схеме, аналогичной традиционным идеальным циклам ДВС. За основу расчета были приняты варианты со стехиометрически пропорциональным долевым соотношением теплоты, получаемой от гидролиза алюмогидрида, диссоциации пергидроля, и регенерации, в сумме обеспечивающей работу, адекватную традиционному циклу Дизеля (3084 Дж при сгорании 0,114 дизтоплива).

В серии расчетов проводилось определение температуры и давления в точках смены термодинамических процессов, суммарной вводимой и выводимой теплоты термического КПД и полезной работы цикла в зависимости от значений основных характеристик: количества добавочной воды на гидролиз $AlH_3$ (3,0 и 4,0 г на один цикл) и степени регенерации теплоты.

Также определялось количество теплоты, вводимой в процесс за счет гидролиза, диссоциации пергидроля и сгорания водорода. На основании сравнения моделей был выбран наиболее оптимальный по основным параметрическим характеристикам вариант (отмечен жирным шрифтом в табл. 1).

В табл. 1 даны $m_{гид}$ – масса гидрида алюминия, подаваемого на гидролиз (г); $m_{перг}$ – масса пергидроля, подаваемого в камеру сгорания (г); $H_2O$ – масса добавочной воды на гидролиз (г); ε – степень сжатия рабочего тела; $q_{гидрол}$ – количество генерируемой при гидролизе теплоты (Дж); $q_{реген}$ – количество теплоты, регенерируемой оборотной водой; $q_{дисс}$ – количество теплоты, генерируемой при термической диссоциации пергидроля в камере сгорания; $q_{сгор}$ – теплота, получаемая за счет сгорания $H_2$ в камере сгорания; $q_1$ – суммарная теплота, введенная в процесс; $q_2$ – теплота в конце адиабатного расширения; $q_3$ – остаточная теплота после регенерации, выводимая из цикла в окружающую среду; $t_2$ – температура паро-водородной фазы перед адиабатным сжатием (К); $t_3$ – температура паро-водородной фазы после адиабатного сжатия (К); $t_4$ – температура паровой фазы в конце сгорания (К); $t_5$ – температура паровой фазы в конце адиабатного расширения (К); $t_6$ – температура воды после теплообменника; $p_2$ – давление перед адиабатным сжатием ($10^5$ Па); $p_{3–4}$ – давление в конце сжатия и в конце изобарного сгорания ($10^5$ Па); $p_5$ – давление паро-газовой фазы в конце адиабатного расширения (МПа); η – термический КПД; А – совершаемая работа адиабатного расширения пара.

**Таблица 1.**

**Численные значения параметрических характеристик Н-Дизеля в зависимости от массы алюмогидрида и пергидроля, количества регенерируемой теплоты и добавочной воды.**

| **Цикл** | **Дизель** | **Н-Дизель** | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| вариант | **1** | **2** | **3** | **4** | **5** | **6** | **7** | **8** | **9** | **10** |
| $m_{гид.}$ | 0,114 | 0,045 | | | 0,04 | 0,045 | | | 0,04 | 0,04 |
| $m_{перг.}$ | – | 0,153 | | | 0,136 | 0,153 | | | 0,136 | 0,136 |
| $H_2O$ | **–** | **3,0** | | | | **4,0** г | | | | **5,0** |
| ε | 17 | 20 | | | | | | | | 25 |
| $q_{гидрол.}$ | – | 596 | 596 | 596 | 530 | 596 | 596 | 596 | **530** | 530 |
| $q_{реген}$ | – | 1300 | 1400 | 1500 | 1500 | 1400 | 1400 | 1500 | **1500** | 1500 |
| $q_{дисс.}$ | – | 444 | 444 | 444 | 357 | 444 | 444 | 444 | **357** | 357 |
| $q_{сгор.}$ | – | 1080 | 1080 | 1080 | 960 | 1080 | 1080 | 1080 | **960** | 960 |
| $q_1$ | 5083 | 3395 | 3464 | 3592 | 3323 | 3395 | 3500 | 3599 | **3329** | 3332 |
| $q_2$ | 1995 | 1606 | 1656 | 1833 | 1783 | 1582 | 1678 | 1783 | **1746** | 1802 |
| $q_3$ | – | 306 | 340 | 333 | 283 | 282 | 278 | 283 | **246** | 302 |
| ρ | 2,64 | 1,098 | 1,095 | 1,093 | 1,084 | 1,086 | 1,084 | 1,082 | **1,074** | 1,063 |
| $t_2$ | | 704 | 726 | 746 | 734 | 612 | 627 | 642 | **634** | 570 |
| $t_3$ | | 1557 | 1596 | 1633 | 1610 | 1382 | 1411 | 1441 | **1423** | 1370 |
| $t_4$ | – | 1709 | 1748 | 1784 | 1746 | 1501 | 1530 | 1559 | **1529** | 1455 |
| $t_5$ | | 697 | 722 | 738 | 717 | 605 | 619 | 631 | **617** | 583 |
| $t_6$ | | 346 | 354 | 352 | 340 | 341 | 340 | 341 | **329** | 345 |
| $p_2$ | 1,0 | 2,4 | 2,4 | 2,5 | 2,5 | 2,05 | 2,1 | 2,16 | **2,13** | 1,91 |
| $p_{3\text{-}4}$ | 48,5 | 104,5 | 107,1 | 109,5 | 108,1 | 92,1 | 94,5 | 96,8 | **96,6** | 114,6 |
| $p_5$ | 3,68 | 2,3 | 2,4 | 2,47 | 2,4 | 2,3 | 2,1 | 2,1 | **2,1** | 2,7 |
| $\eta_t$ | 0,607 | 0,903 | 0,903 | 0,908 | 0,915 | 0,917 | 0,920 | 0,921 | **0,926** | 0,909 |
| Работа | 3084 | 3066 | 3154 | 3261 | 3040 | 3113 | 3222 | 3316 | **3083** | 3030 |

Резюмируя полученные результаты, можно охарактеризовать особенности параметров и показателей.

***Температура.*** В исследованных вариантах устанавливается закономерное возрастание этого параметра при увеличении квоты регенерируемой теплоты. В то же время при одинаковом количестве регенерируемой теплоты температура рабочего тела понижается при увеличении массы добавочной воды, подаваемой на гидролиз.

Существенно отличаются в сравнении с традиционным Дизелем температурные условия в Н-Дизеле. В последнем температура рабочего тела перед и после адиабатного сжатия существенно выше, а в конце сгорания и адиабатного расширения, наоборот, ниже. Это свидетельствует, с одной стороны, о меньшей контрастности и большей мягкости эксплуатационного режима работы двигателя, а с другой – играет определяющую роль в значительном повышении термического КПД цикла Н-Дизеля.

В общем виде для термодинамического цикла Н-Дизеля устанавливается функциональная зависимость температуры как от давления, объема и степени сжатия, так и от квоты добавочной воды на гидролиз и количества регенерируемой теплоты.

***Давление.*** В отличие от традиционного цикла Н-Дизель характеризуется значительно более высокими давлениями уже на стадии адиабатного сжатия при близких степенях сжатия. Причиной этому служит повышенное давление паро-водородного заряда, подаваемого в рабочий цилиндр после гидролиза алюмогидрида. В небольшой степени на величину давления влияет квота добавочной воды, несколько снижая его при своем увеличении. Характерно почти в 1,5 раза более низкое давление в конце адиабатного расширения, что свидетельствует об увеличении крутящего момента и более полном использовании энергии на совершение работы, несмотря на пониженный температурный уровень.

Таким образом, давление в описываемом цикле играет главенствующую роль в определении мощности цикла и его КПД.

Увеличение степени сжатия приводит к чрезмерному росту давления в камере сгорания без какого-либо повышения КПД даже при увеличении квоты добавочной воды, что определяет наиболее эффективную величину этой характеристики, близкую к используемой в традиционном цикле Дизеля. Это сводит к минимуму необходимость конструктивных изменений в двигателе.

***Термический КПД.*** Идеальный термодинамический цикл Н-Дизеля, как и Дизеля, отличается существенно более высоким термическим КПД, обусловленным более высокими темпера-

турой и давлением рабочего тела в начале и конце адиабатного сжатия, что достигается не за счет отрицательной работы на его сжатие, а в основном с помощью высвобождающейся химической энергии при гидролизе алюмогидрида. Кроме этого, повышение КПД связано также с увеличением квоты добавочной воды на гидролиз и количества регенерируемой теплоты. В определенной степени здесь сказывается и энергия, введенная в процесс при диссоциации пергидроля.

***Работа цикла.*** В проведенной серии расчетов параметрических характеристик Н-Дизеля и традиционного Дизеля общим знаменателем была выбрана адекватность получаемой работы. Относительно этой характеристики проводилось сравнение эффективности по удельному расходу энергии на совершение одинаковой работы.

Если в исходном варианте традиционного Дизеля на получение адекватной работы (3084 Дж) требовалось затратить 5083 Дж исходной энергии, то в Н-Дизеле на это необходимо всего 3329 Дж (вариант 9), то есть в 1,5 раза меньше. Причем расходная энергодоля самого топлива (гидрида алюминия) при этом составляет лишь около 45 % (1490 Дж) или в 3,4 раза меньше, чем в случае использования дизтоплива. Из этого следует, что при одном и том же объеме исходного горючего Н-Дизель проработает по времени в 3,4 раза дольше при адекватности развиваемой мощности двигателя.

Если принять условную топливную емкость 150 дм$^3$, то в ней поместится 120 кг дизтоплива или 220,5 кг гидрида алюминия с энергопотенциалом соответственно 5060 и 8250 МДж. В традиционном Дизеле при условно принятых объеме цилиндра 2,4 дм$^3$, 2000 об/мин и расходе 0,114 г дизтоплива на один цикл его запаса хватит на 8,77 часов работы. При адекватной по объему емкости запаса алюмогидрида в оптимизированном варианте 9 (табл. 1) будет достаточно на 45,9 час. То есть пробег автомобиля при одинаковой объемной заправке гидрида алюминия возрастает в 5,24 раза по сравнению с дизелем или почти в 10,5 раза в сравнении со сжатым до 35 МПа водородом в моделях на топливных элементах. Но в сравнении с последними Н-Дизель может развиваться на существующей производственной и сервисной инфраструктуре автотранспортной индустрии.

***Пергидроль.*** Помимо выполнения своего прямого назначения, как носителя кислорода (вместо воздуха) для сгорания получаемого при гидролизе водорода пергидроль дает возможность исключить значительные затраты на компрессию воздуха. При этом отпадает необходимость в самом компрессоре и сохраняется практически без изменения система впрыска традиционного дизтоплива.

Кроме этого пергидроль, имея более высокую температуру кипения (150°С) и замерзания, может быть до впрыска использован для охлаждения рабочего цилиндра двигателя, тем более что термическая напряженность в корпусе головки цилиндра будет существенно ниже таковой для традиционного Дизеля. Таким образом, отпадает необходимость в существующей системе охлаждения. Причем, забираемая от стенок цилиндра теплота, вновь возвращается в камеру сгорания для совершения работы.

Немаловажным обстоятельством является то, что при диссоциации пергидроля кислород отщепляется в атомарной форме, устойчивость которого к рекомбинации повышена в условиях высоких температур. Вследствие этого его реакционная способность к взаимодействию с также разогретым водородом весьма высока, что способствует более активному и полному процессу сгорания последнего. Это дает возможность подавать пергидроль после прохождения поршнем верхней мертвой точки, усиливая тем самым эффективность адиабатного расширения. К тому же энергетика такого процесса сгорания значительно более высокая, чем для обычного взаимодействия молекулярных форм водорода и кислорода, о чем свидетельствует сравнение энтальпийных эффектов этих реакций:

$2H_2 + O_2 \rightarrow 2H_2O$ $\quad \Delta H^{298} = -285{,}84$ кДж/моль;

$H_2 + O \rightarrow H_2O$ $\quad \Delta H^{298} = -535{,}02$ кДж/моль.

То есть сгорание водорода в атомарном кислороде по энерговыходу в 1,87 раза выше. К этому следует добавить, что при рекомбинации части атомарного кислорода, также выделится теплота (498 кДж /моль).

В таком случае суммарная энтальпия составит те же 535,02 кДж/моль. Это в еще большей степени может позволить уменьшить (в 1,87 раза) затраты алюмогидридного топлива, не снижая величины получаемой работы. В проведенных расчетах подобная возможность не учитывалась, что ставит актуальным ее более детальное моделирование.

**Выводы и рекомендации.**

1. При использовании алюмогидридного энергоносителя и пергидрольного окислителя вместо воздуха имеют место более мягкие термические условия работы цилиндра двигателя без снижения количества выполняемой работы.

2. Общая сумма теплоты, вводимой в оптимизированный цикл Н-Дизеля (вариант 9), складывается из теплоты гидролиза алюмогидрида (16%), термической диссоциации пергидроля (10,5%), сгорания водорода (28,5%) и регенерируемой теплоты (45,0%). Таким образом, на до-

лю основного энергоносителя водорода приходится меньше трети общего теплового баланса цикла.

3. Существенное повышение термического КПД Н-Дизеля обусловлено вводом в рабочий цилиндр теплоты гидролиза с повышенным давлением перед адиабатным сжатием, добавочной водой на гидролиз и количеством регенерированной теплоты.

4. Результаты исследования подтверждают вывод о неоспоримых преимуществах предлагаемого типа дизельного двигателя как с точки зрения его эксплуатационных характеристик, так и с точки зрения экологической безопасности, поскольку единственным конечным продуктом работы Н-Дизеля является парообразная вода. Получаемый в результате гидролиза оксид алюминия аккумулируется и направляется на технологическую регенерацию гидрида алюминия, то есть является циркулирующим внутри схемы продуктом.

5. Задачей последующих исследований является разработка проекта стендовых испытаний на базе модернизированного дизельного двигателя.

ЛИТЕРАТУРА


1. Афанасьев Н. Водородные автомобили станут массовыми через шесть лет [Электронный ресурс]. – Режим доступа : http://www.autonews.ru/autobusiness/news.shtml
2. Бюро международных информационных программ Государственного департамента США. Водород все шире внедряется на транспорте и в электроэнергетике [Электронный ресурс]. – Режим доступа : http://www.america.gov/st/washfile-russian
3. Мировой автопром переходит на водород [Электронный ресурс]. – Режим доступа : http://www.avto.ru/news/news
4. Водород вместо бензина [Электронный ресурс]. – Режим доступа : http://www.autoterminal.ru/vodorod_topl.php
5. Водородные Focus готовят к запуску в серию. [Электронный ресурс]. – Режим доступа : http://auto-show-info.ru/?m=20081213
6. General Motors Generation V fuel cell stack [Электронный ресурс]. – Режим доступа : http://green.autoblog.com
7. Подзноев Г. П. Металлогидридные системы энергообеспечения транспорта / Г. П. Подзноев, У. А. Абдулгазис // Двигатели внутреннего сгорания : научно-технический журнал. – Харьков : НТУ «ХПИ», 2004. – № 1. – С. 32–36.
8. Подзноев Г. П. Возможности повышения эффективности термодинамического цикла Дизеля путем использования альтернативного энергоносителя / Г. П. Подзноев, У. А. Абдулгазис // Двигатели внутреннего сгорания : научно-технический журнал. – Харьков : НТУ «ХПИ», 2007. – № 1. – С. 87–91.
9. Подзноев Г. П. Термодинамические особенности регенеративного цикла Н-дизеля с использованием энергоносителя на основе гидрида алюминия / Г. П. Подзноев, У. А. Абдулгазис // Двигатели внутреннего сгорания : научно-технический журнал. – Харьков : НТУ «ХПИ», 2008. – № 2. – С. 13–18.
10. Двигатель Вальтера [Электронный ресурс]. – Режим доступа : http://dic.academic.ru/dic.nsf/ruwiki

УДК 629.017

**Подригало М. А.**

# НОВЫЙ ПОДХОД К ОЦЕНКЕ ТЯГОВОГО БАЛАНСА АВТОМОБИЛЯ

(В порядке обсуждения)

*Уточнене поняття тягового (силового) балансу автомобіля. Зроблена оцінка динамічних властивостей автомобілів за величиною надлишкової потужності двигуна.*

***Ключові слова:*** *автомобіль, тяговий баланс, двигун, потужність, прискорення.*

*Уточнено понятие тягового (силового) баланса автомобиля. Произведена оценка динамических особенностей автомобилей по величине*

***Ключевые слова:*** *автомобиль, тяговый баланс, двигатель, мощность, ускорение.*

*The concept of vehicle tractive balance has been specified. The estimation of vehicle dynamic properties according it excessive engine power has been done.*

***Keywords:*** *vehicle, tractive balance, engine, excessive power, acceleration.*

**Постановка проблемы.** Теория автомобиля или теория эксплуатационных свойств автомобиля является прикладной наукой, основу которой составляет классическая механика. При формировании положений прикладной науки необходимо следить за тем, чтобы они не противоречили законам механики. Однако одно из ключевых положений теории эксплуатационных свойств автомобиля состоит в том, что тяговый баланс по своему смыслу противоречит законам

классической механики, т. е. является некорректным.

**Анализ литературы.** Впервые понятия мощностного и тягового баланса автомобиля ввел Е. А. Чудаков [1].

Мощностной баланс характеризует структуру расхода энергии двигателя на преодоление сил дорожного и аэродинамического сопротивления движения движению автомобиля. Запас мощности двигателя используется для разгона автомобиля, т. е. идет на накопление его кинетической энергии.

Запас мощности двигателя также необходим для сохранения автомобилем требуемой скорости движения (уровня кинетической энергии) при резком изменении сил сопротивления движению. Уравнение мощностного баланса имеет следующий вид [1]:

$$\eta_{тр} N_e = N_f + N_i + N_w + N_p , \qquad (1)$$

где $N_e$ – эффективная мощность двигателя;

$\eta_{тр}$ – КПД трансмиссии;

$N_f$ – затраты мощности двигателя на преодоление сил сопротивления движению;

$N_i$ – затраты мощности двигателя на преодоление подъема пути;

$N_w$ – затраты мощности двигателя на преодоление аэродинамического сопротивления;

$N_p$ – запас мощности двигателя, используемый для разгона автомобиля, и преодоление кратковременного увеличения сопротивления движению.

Уравнение мощностного баланса является основой для оценки тягово-скоростных и энергетических показателей автомобиля.

Энциклопедический словарь [2] определяет смысл слова «баланс» (от франц. слова balance в буквальном смысле – «весы») как равновесие, уравновешивание. Если для энергетического (мощностного) баланса это справедливо, поскольку является проявлением закона сохранения энергии, то равновесие сил (силовой баланс) должно обеспечивать автомобилю либо покой, либо состояние равномерного прямолинейного движения (первый закон динамики).

Для составления уравнения тягового или силового баланса в работе [1] применен принцип Даламбера [3], т. е. кинетостатики, при котором уравнения динамики решаются с помощью уравнений статики. В этом случае произведение массы автомобиля на его ускорение (имеет размерность силы) с противоположным знаком входит в уравнение квазистатики.

Уравнение называется квазистатическим, поскольку уравновешивающая сила инерции является фиктивной реактивной силой. Использование принципа Даламбера позволяет легко определить компоненты уравнений динамики, особенно сложных систем.

Уравнение силового баланса, предложенное в работе [1], имеет следующий вид:

$$P_к = P_f + P_w \pm P_i \pm P_j , \qquad (2)$$

где $P_к$– суммарное усилие на ведущих колесах автомобиля;

$P_w$ – сила аэродинамического сопротивления;

$P_i$ – сила сопротивления при движении автомобиля на уклоне (скатывающая сила); имеет положительное значении при движении на подъеме и отрицательное – на спуске;

$P_j$ – сила инерции автомобиля (уравновешивающая сила имеет положительное значение при разгоне автомобиля и отрицательное – при торможении).

В работе Н. А. Яковлева [4] сила инерции даже названа «силой сопротивления разгону». К сожалению, этот термин встречается и в работах современных авторов [5].

Возникает вопрос о том, что произойдет с автомобилем, если «сила сопротивления разгону» станет равной нулю? Автомобиль бы разгонялся мгновенно или находился в состоянии равномерного движения?

В справочнике фирмы BOSCH тяговый баланс определен как «уравнение равновесия между движущей силой и силами сопротивления движению» [5].

Классическая механика [3] напоминает о том, что, применяя метод Даламбера, следует иметь в виду, что он, как и основной закон динамики, относится к движению, рассматриваемому по отношению к ***инерциальной системе отсчета.***

При этом на точку механической системы, движение которой изучается, действуют только внешние и внутренние силы, возникающие в результате взаимодействия точек системы друг с другом и с точками, не входящими в систему; под действием этих сил точки системы и движутся с соответствующими ускорениями.

Силы же инерции, о которых говорится в принципе Даламбера, на движущиеся точки не действуют, иначе эти точки находились бы в покое или двигались бы без ускорений, и тогда бы не было и самих сил инерции.

Введение сил инерции – это лишь прием, позволяющий составлять уравнения динамики с помощью более простых методов статики.

Таким образом, хотя уравнение (2) и позволяет легко определить составляющие его компоненты, то его скорее следовало бы назвать уравнением силового «дисбаланса», поскольку оно не отвечает равновесию сил с позиций классической механики.

Пагубность существующего подхода заключается еще и в том, что многими авторами сила инерции автомобиля $P_j$ воспринимается как активная сила, способная вызвать движение. Например, при объяснении механизма заноса автомобиля в процессе торможения сила инерции представляется возмущающей силой (увеличивающий угол поворота продольной оси автомобиля при заблокированных задних колесах) и стабилизирующей силой (при заблокированных передних колесах) [6].

Сила инерции – это фиктивная реактивная сила и движущей силой быть не может.

**Целью исследования** является совершенствование метода оценки динамических свойств автомобиля путем уточнения понятия тяговый (силовой) баланс автомобиля.

Для достижения указанной цели необходимо решить следующие задачи:

- определить понятие тягового (силового) баланса в соответствии с законами классической механики,
- произвести оценку динамических свойств автомобилей по величине избыточной мощности двигателя.

**Изложение основного материала.**

***Определение понятия тягового (силового) баланса автомобиля.*** На наш взгляд, тяговый (силовой) баланс автомобиля возникает при равенстве движущей (тяговой) силы и суммарной силы сопротивления движению. Сила инерции автомобиля в этом балансе не учитывается. Поэтому силовой баланс соответствует либо состоянию покоя, либо равномерного прямолинейного движения автомобиля.

Следует отметить, что силовой баланс может быть статическим и динамическим.

Статический силовой баланс соответствует состоянию покоя автомобиля, т. е. удержанию его на месте. Динамический силовой баланс или динамическое равновесие реализуется при движении автомобиля с постоянной скоростью по прямолинейному участку пути.

Динамический силовой баланс автомобиля неустойчив, как и всякое динамическое равновесие. Для его удержания водителю необходимо постоянно управлять педалью подачи топлива, а при необходимости – осуществлять переключение передач. При этом осуществляется регулирование тяговой силы на ведущих колесах в соответствии с изменением суммарной силы сопротивления движению.

Режим тягового (силового) баланса характеризуется совокупностью точек на отрезке кривой суммарного сопротивления движению автомобиля. При полной подаче топлива (работе двигателя на внешней скоростной характеристике) – точка $M$, а при работе двигателя на частичной скоростной характеристике – $M'$.

Неустойчивость состояния динамического баланса автомобиля связана, прежде всего, с изменением силы сопротивления движению:

$$\sum P_c = P_f \pm P_i + P_w = P_\psi + P_w. \qquad (3)$$

Точки $M$ *и* $M'$ соответствуют получению динамического баланса при постоянных линейных скоростях автомобиля $V_1$ и $V_2$ соответственно (рис. 1).

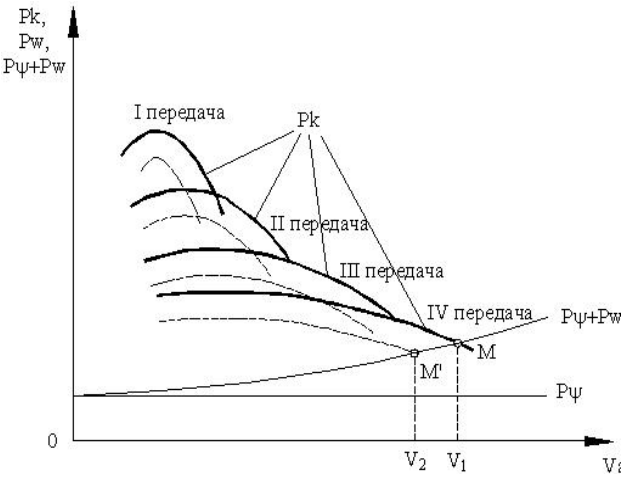



**Рис. 1. Силовая характеристика автомобиля:**
**_____ – при работе двигателя на внешней скоростной характеристике;**
**_ _ _ _ _ – при работе двигателя на частичной скоростной характеристике;**
***M, M'*** **– точки, в которых реализуется силовой (тяговый) баланс автомобиля при полной подаче топлива и работе на частичной скоростной характеристике;**
$\boldsymbol{P_\psi}$ **– сила суммарного дорожного сопротивления,** $\boldsymbol{P_\psi = P_f \pm P_i}$**.**

Если же динамическое равновесие нарушается вследствие изменения силы $\sum P_c$, то мы получим уже семейство кривых динамического силового баланса (рис. 2).

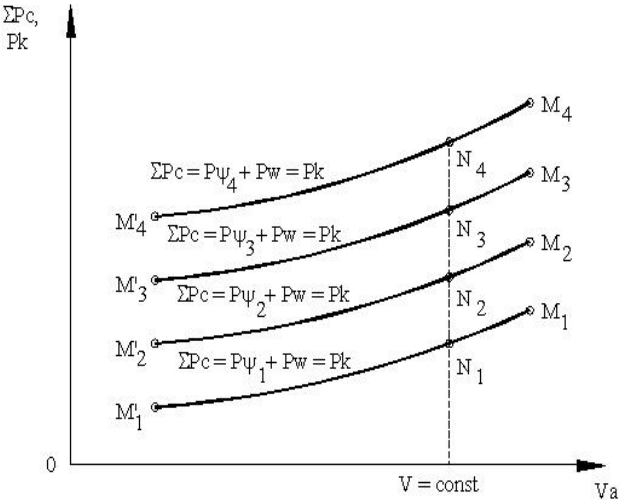



**Рис. 2. Линии динамического силового баланса при различных величинах** $\boldsymbol{P_\psi}$**.**

Следует отметить, что эти кривые эквидистантны, поскольку изменение силы $\sum P_c$ (3) происходит, как правило, за счет компоненты $P_\psi$.

Для поддержания постоянной линейной скорости движения автомобиля $V$ = const изменение тяговой силы должно происходить по вертикали (см. рис. 2).

В точках $N_1$, $N_2$, $N_3$, $N_4$ осуществляется силовой баланс автомобиля соответственно при $P_{\psi 1}$, $P_{\psi 2}$, $P_{\psi 3}$, $P_{\psi 4}$.

При силовом динамическом балансе справедливо равенство мощностей:

$$N_e \eta_{тр} = \sum N_c = V_a(P_\psi + P_\omega) = m_a g \psi V_a + kFV_a^3,$$

где $\sum N_c$ – суммарная мощность сил сопротивления движению;

$m_a$ – общая масса автомобиля (полная);

$g$ – ускорение свободного падения, $g$ = 9,81 м/с$^2$;

$kF$ – фактор сопротивления воздуха ($k$ – коэффициент сопротивления воздуха, $F$ – мидель).

Из уравнения (4) определим удельную мощность двигателя, необходимую для получения силового баланса:

$$\frac{N_e}{m_a} = \frac{V_a}{\eta_{тр}}\left(g\psi + \frac{kF}{m_a}V_a^2\right). \qquad (5)$$

При $V_a = V_{max}$ и $N_e = N_{emax}$ существующие методики определения максимальной мощности двигателя при проектировании автомобиля фактически используют условие получения силового динамического баланса при $V_a = V_{max}$. Однако в последние годы на примере легковых автомобилей зарубежного изготовления мы наблюдаем значительный рост удельных мощностей двигателей $N_{уд} = \frac{N_e}{m_a}$. Это означает, что динамические свойства автомобилей, определяемые запасом мощности двигателей, необходимы для обеспечения приемистости машины в городском цикле движения.

***Оценка динамических свойств автомобилей.*** Для определения запаса мощности двигателя, необходимого для реализации желаемых динамических свойств автомобиля (приемистости), нужно составить уравнение динамики (по аналогии с предыдущим – уравнение силового «дисбаланса»):

$$\dot{V}_a = \frac{1}{m_a \delta_{вр}}\left(P_k - \sum P_c\right), \qquad (6)$$

где $\delta_{вр}$ – коэффициент учета вращающихся масс двигателя и трансмиссии.

Если вынести $\sum P_c$ за скобки, то выражение (6) примет вид:

$$\dot{V}_a = \frac{\sum P_c}{m_a \delta_{вр}}\left(\frac{P_k}{\sum P_c} - 1\right). \qquad (7)$$

Отношение $\frac{P_k}{\sum P_c}$ нами в работах [7, 8] предложено называть коэффициентом динамичности $K_Д$ автомобиля. Значение $K_Д$ = 1 соответствует получению динамического силового (тягового) баланса. Превышение этой величины над единицей характеризует динамичность автомобиля. Коэффициент динамичности можно представить в виде отношения мощностей:

(4)
$$K_Д = \frac{P_k}{\sum P_c} = \frac{P_k \cdot V_a}{\sum P_c \cdot V_a} = \frac{\eta_{трN}}{\sum N_c}. \qquad (8)$$

Поэтому коэффициент динамичности $K_Д$ характеризует запас мощности двигателя, необходимый для обеспечения приемистости автомобиля.

Коэффициент избытка мощности двигателя, идущий на разгон автомобиля:

$$K_{изб} = K_Д - 1. \qquad (9)$$

Тогда выражение (7), с учетом (9) примет вид:

$$\dot{V}_a = \frac{\sum P_c}{m_a \delta_{вр}} \cdot K_{изб}. \qquad (10)$$

Умножив левую и правую часть (10) на $V_a$ и, учитывая, что мощность на ведущих колесах автомобиля равна произведению мощности двигателя на КПД трансмиссии, получим:

$$V\dot{V}_a = \frac{\Delta N_e}{m_a \delta_{вр}} \eta_{тр}, \qquad (11)$$

где $\Delta N_e$ – дополнительная мощность двигателя, идущая на разгон автомобиля.

Величина $\frac{1}{\delta_{вр}}$ представляет собой динамический КПД трансмиссии, учитывающий потери мощности двигателя на разгон вращающихся масс двигателя и трансмиссии.

С учетом этого, уравнение (11) запишем в виде:

$$m_a V_a \dot{V}_a = \Delta N_e \cdot \eta_{тр}^{общ}, \qquad (12)$$

где $\eta_{тр}^{общ}$ – общий КПД трансмиссии.

$$\eta_{тр}^{общ} = \eta_{тр}^{см} \cdot \eta_{тр}^{Д}, \qquad (13)$$

где $\eta_{тр}^{ст}$ – статический КПД трансмиссии.

Уравнение (12) связывает между собой энергетические и динамические показатели автомобиля. Дополнительная удельная мощность двигателя определяется из уравнения динамичности автомобиля (12):

$$V_a \dot{V}_a = \Delta N_{уд} \cdot \eta_{тр}^{общ}. \qquad (14)$$

Дополнительная удельная мощность двигателя в соответствии с уравнением (14) определяется в зависимости от величины линейного ускорения автомобиля $\dot{V}_a$, которую необходимо реализовать при расчетной скорости движения $V_a$.

**Выводы.**

1. Понятие тягового (силового) баланса, используемое в теории эксплуатационных свойств автомобиля при оценке его тягово-скоростных свойств, противоречит положениям классической механики, касающимся равновесного состояния системы, или, другими словами, баланса сил.

2. Понятие тягового (силового) баланса должно относиться к состоянию покоя или равномерного прямолинейного движения, при котором ускорение автомобиля равно нулю.

3. Подход к равновесному состоянию автомобиля при движении с уточненных позиций силового баланса позволил получить простейшую зависимость (14) для определения дополнительной мощности двигателя, необходимой для разгона автомобиля. Это необходимо для проектирования автомобилей, двигающихся в городском ездовом цикле.

ЛИТЕРАТУРА


1. Чудаков Е. А. Теория автомобиля / Е. А. Чудаков. – М.–Л. : Машгиз, 1940. – 396 с.
2. Энциклопедический словарь / [А. М. Прохоров, М. С. Типяров, Е. М. Жуков, Н. И. Иноземцев, И. Л. Кнунянц, П. Н. Федосеев, М. Б. Хранченко]. – М. : Советская энциклопедия, 1980. – 1600 с.
3. Тарг С. М. Краткий курс теоретической механики / С. М. Тарг. – М. : Наука, 1968. – 480 с.
4. Яковлев Н. А. Теория и расчет автомобиля / Н. А. Яковлев. – М. : Машиностроение, 1949. – 370 с.
5. BOSCH: автомобильный справочник ; [пер. с англ.]. – М. : Изд-во «За рулем», 2000. – 896 с.
6. Чудаков Е. А. Устойчивость автомобиля при заносе / Е. А. Чудаков. – М. : Изд-во АН СССР, 1945. – 144 с.
7. Динамика автомобиля / [Подригало М. А., Волков В. П., Бобошко А. А., Павленко В. А., Файст В. Л., Клец Д. М., Редько В. В.]; под ред. М. А. Подригало. – Харьков : Изд-во ХНАДУ, 2008. – 424 с.
8. Подригало М. А. Коэффициент динамичности автомобиля / М. А. Подригало, В. Л. Файст // Проблеми надійності машини та засобів механізації сільськогосподарського виробництва : зб. наукових праць ХНТУСХ ім. П. Василенко. Вип. 69. – Харків, 2008. – С. 375–380.

УДК 629.017

**Подригало М. А., Коробко А. І.**

# СТІЙКІСТЬ АВТОМОБІЛЯ ПРИ РІЗНИЦІ ГАЛЬМІВНИХ СИЛ НА ЙОГО БОРТАХ

*Проведено дослідження стійкості автомобіля при різниці гальмівних сил на його бортах. В якості критерію стійкості автомобіля проти заносу використовувався коефіцієнт стійкості. Отримано залежності для визначення коефіцієнта стійкості автомобіля при різниці гальмівних сил на його бортах. Проведено розрахунки по отриманим залежностям і визначено вплив конструктивних і вагових параметрів на стійкість автомобіля.*

***Ключові слова:*** *стійкість автомобіля, гальмівні сили, занос автомобіля.*

*Проведено исследование устойчивости автомобиля при разности тормозных сил на его бортах. В качестве критерия устойчивости автомобиля против заноса использовался коэффициент устойчивости. Получены зависимости для определения коэффициента устойчивости автомобиля при разности тормозных сил на его бортах. Проведен расчёт по полученным зависимостям и определено влияние конструктивных и весовых параметров на устойчивость автомобиля.*

***Ключевые слова:*** *устойчивость автомобиля, тормозные силы, занос автомобиля.*

*Research of motor car motion stability at difference of brake forces on its sides. Stability factor as a basis for criterion of motor car stability against drift was used. Dependences for stability factor detemining with differences of brake forces on motor car sides are got. Calculations on reseived dependences are carried out and influence of motor car constructive and weight parameters on the stability factor is determined.*

***Key words:*** *motor car motion stability, brake forces, motor car drift.*

**Постановка проблеми.** Нерівномірна дія гальмівних механізмів на колесах однієї вісі автомобіля призводить до появи різниці гальмівних сил на його бортах.

**Аналіз останніх досягнень та публікацій.** Дослідженню впливу бортової і осьової нерівномірності гальмівних сил на стійкість автомобіля при гальмуванні присвячені роботи [1–3]. В роботах [1, 3] доказано, що на стійкість автомобіля при гальмуванні найбільше впливає нерівномірність дії передніх гальмівних механізмів.

В роботі [1] при оцінці стійкості розглядав-

ся тільки запас по щепленню в боковому напрямку задніх коліс автомобіля. В якості параметра, що кількісно характеризує здатність автомобіля до заносу, в роботі [1] запропоновано показник, що представляє собою відношення сумарної фактично діючої бокової сили на задніх колесах до її максимально можливого значення по зчепленню. Але указаний показник не дозволяє визначити взаємозв'язок стійкості автомобіля проти заносу з величиною можливого кутового прискорення машини в початковий момент часу при виникненні заносу.

Коефіцієнт стійкості був запропонований в роботі [4] в якості критерію стійкості автомобіля проти заносу. Вказаний коефіцієнт був отриманий [4] із рівняння:

$$I_{zc} \cdot \frac{d\omega_z}{dt} = M_{зб} - M_{стб} = M_{зб}\left(1 - k_{ст}\right), \qquad (1)$$

де $I_{zc}$ – момент інерції автомобіля відносно центральної вертикальної осі;

$\omega_z$ – кутова швидкість автомобіля в площині дороги;

$t$ – час;

$M_{зб}$ – збурюючий момент;

$M_{стб}$ – стабілізуючий момент;

$k_{ст}$ – коефіцієнт стійкості автомобіля,

$$k_{ст} = \frac{M_{стб}}{M_{зб}}. \qquad (2)$$

При $k_{ст} \geq 1$ автомобіль має стійкість проти заносу, тобто статичну стійкість, так як при будь-якому значенні $M_{зб}$ величина $\frac{d\omega_z}{dt} < 0$. При $k_{ст} < 1$ будь-який збурюючий момент викликає появу $\frac{d\omega_z}{dt} > 0$ і занос автомобіля. Початкова величина указаного кутового прискорення буде залежати від $M_{зб}$ і $k_{ст}$.

В роботі [4] коефіцієнт стійкості використовувався для оцінки впливу зміни коефіцієнта $\beta_d$ розподілу гальмівних сил між осями автомобіля при службових гальмуваннях на стійкість останнього проти заносу.

Проте в розглянутих роботах не визначається коефіцієнт стійкості автомобіля проти заносу при різниці гальмівних сил на його бортах.

**Метою дослідження** є визначення граничних значень різниці гальмівних сил на бортах і окремих осях автомобіля. Для досягнення указаної мети необхідно визначити коефіцієнти стійкості при першочерговому боковому ковзанні передніх та задніх коліс автомобіля.

**Викладення основного матеріалу.**

***Коефіцієнт стійкості автомобіля при першочерговому боковому ковзанні передніх коліс.*** В роботі [5] визначена гранична величина бокової реакції дороги на колесах вісі, яка схильна першою ковзати в боковому напрямку. Ця гранична бокова реакція є найменшою із двох граничних реакцій (на передній або задній вісі):

$$\left(R_{yi\max}\right)_{\min} = \sqrt{0{,}25\varphi^2 R_{zi}{}^2 - \left(P''_{Ti}\right)^2} + \sqrt{0{,}25\varphi^2 R_{zi}{}^2 - \left(P'_{Ti}\right)^2 + \Delta P_{Ti}\left(P''_{Ti} - \Delta P_{Ti}\right)}, \qquad (3)$$

де $R_{zi}$ – вертикальна реакція дороги на колесах $i$-ї вісі автомобіля;

$P''_{Ti}$ – гальмівна сила на колесах $i$-ї вісі, що має більше її значення;

$P_{Ti}$ – різниця гальмівних сил на $i$-ті вісі;

$$\Delta P_{Ti} = P''_{Ti} - P'_{Ti} \qquad (4)$$

$P'_{Ti}$ – гальмівна сила на колесах $i$-ї вісі, що має менше її значення;

$\varphi$ – коефіцієнт зчеплення коліс з дорогою.

Збурюючий момент обумовлений різницею гальмівних сил на бортах автомобіля [5]:

$$M_{зб} = \frac{B}{2}\left(\Delta P_{T1} + \Delta P_{T2}\right), \qquad (5)$$

де $B$ – колія автомобіля;

$\Delta P_{T1}$, $\Delta P_{T2}$ – різниця гальмівних сил на колесах передньої задньої осі автомобіля.

Стабілізуючий момент:

$$M_{стб} = L\left(R_{y\max}\right)_{\min}, \qquad (6)$$

де $L$ – повздовжня колісна база автомобіля.

При $R_{y1\max} < R_{y2\max}$ величина $(R_{yi\max})_{\min} = R_{y1\max}$, і першими починають бокове ковзання колеса передньої осі. Вираз (3) в цьому випадку буде мати вид:

$$R_{y1\max} = \sqrt{0{,}25\varphi^2 R_{z1}{}^2 - \left(P''_{T1}\right)^2} + \sqrt{0{,}25\varphi^2 R_{z1}{}^2 - \left(P'_{T1}\right)^2 + \Delta P_{T1}\left(P''_{T1} - \Delta P_{T1}\right)}. \qquad (7)$$

Коефіцієнт стійкості автомобіля:

$$k_{ст} = \frac{2L}{B}\frac{R_{y1\max}}{\Delta P_{T1} + \Delta P_{T2}}. \qquad (8)$$

Після підстановки (7) в (8) и перетворювань маємо:

$$k_{ст} = \frac{2L}{B}\frac{\sqrt{0{,}25\varphi^2 R_{z1}{}^2 - \left(P''_{T1}\right)^2}}{\Delta P_{T1} + \Delta P_{T2}} \times \left[1 + \sqrt{1 + \Delta P_{T1}\frac{P''_{T1} - \Delta P_{T1}}{0{,}25\varphi^2 R_{z1}{}^2 - \left(P''_{T1}\right)^2}}\right], \qquad (9)$$

Вертикальна реакція на колесах передньої осі може бути визначена як [5]

$$R_{z1} = m_a g\frac{b}{L} + m_x m_a \varphi g\frac{h}{L}, \qquad (10)$$

де $m_a$ – загальна маса автомобіля;

$g$ – прискорення вільного падіння; $g$ = 9,81 м/с$^2$;

$h$ – висота центру мас автомобіля;

$b$ – відстань від задньої осі автомобіля до проекції його центру мас на горизонтальну поверхню;

$m_x$ – тангенціальний коефіцієнт використання зчіпної ваги автомобіля при гальмуванні [6].

$$m_x = \frac{P_{T1} + P_{T2}}{m_a \varphi g}, \qquad (11)$$

де $P_{T1}$, $P_{T2}$ – сумарні гальмівні сили на колесах передньої і задньої осей.

Відповідно $P''_{T1}$ можна визначити як

$$P''_{T1} = 0{,}5\beta_d m_x m_a \varphi g, \qquad (12)$$

де $\beta_d$ – дійсний коефіцієнт розподілу гальмівних сил на передню вісь,

$$\beta_d = \frac{P_{T1}}{P_{T1} + P_{T2}}. \qquad (13)$$

Після підстановки виразів (10) і (12) у відношення (9) отримаємо:

$$k_{ст} = \frac{L}{B} \frac{\sqrt{\left(\frac{b}{L} + m_x \varphi \frac{h}{L}\right)^2 - m_x^2 \beta_d^2}}{(\Delta P_{T1} + \Delta P_{T2})/(m_a \varphi g)} \times$$

$$\times \left[1 + \sqrt{1 + \frac{2\Delta P_{T1}}{m_a \varphi g} \cdot \frac{m_x \beta_d - 2\frac{\Delta P_{T1}}{m_a \varphi g}}{\left(\frac{b}{L} + m_x \varphi \frac{h}{L}\right)^2 - m_x^2 \beta_d^2}}\right]. \qquad (14)$$

Із виразу (11) визначимо:

$$m_a \varphi g = \frac{P_{T1} + P_{T2}}{m_x} = \frac{P_T}{m_x}. \qquad (15)$$

Підставляючи (15) в (14), отримаємо:

$$k_{ст} = \frac{L}{B} \cdot \frac{\sqrt{\left(\frac{b}{L}\frac{1}{m_x} + \varphi \frac{h}{L}\right)^2 - \beta_d^2}}{(\Delta P_{T1} + \Delta P_{T2})/P_T} \times$$

$$\times \left[1 + \sqrt{1 + 2\frac{\Delta P_{T1}}{P_T} \cdot \frac{\beta_d - 2\frac{\Delta P_{T1}}{P_T}}{\left(\frac{b}{L}\frac{1}{m_x} + \varphi \frac{h}{L}\right)^2 - \beta_d^2}}\right], \qquad (16)$$

Якщо припустити, що різниця гальмівних сил на осях пропорціональні величинам сумарних гальмівних сил на цих осях, то справедливо співвідношення:

$$\frac{\Delta P_{T1}}{\Delta P_{T2}} = \frac{P_{T1}}{P_{T2}} = \frac{\beta_d}{1 - \beta_d}. \qquad (17)$$

Із виразу (17) визначимо:

$$\Delta P_{T2} = P_{T1} \frac{1 - \beta_d}{\beta_d}. \qquad (18)$$

Підставляючи (18) в (17), отримаємо:

$$k_{ст} = \frac{L}{B} \beta_d \frac{\sqrt{\left(\frac{b}{L}\frac{1}{m_x} + \varphi \frac{h}{L}\right)^2 - \beta_d^2}}{\Delta P_{T1}/P_T} \times$$

$$\times \left[1 + \sqrt{1 + 2\frac{\Delta P_{T1}}{P_T} \cdot \frac{\beta_d - 2\frac{\Delta P_{T1}}{P_T}}{\left(\frac{b}{L}\frac{1}{m_x} + \varphi \frac{h}{L}\right)^2 - \beta_d^2}}\right]. \qquad (19)$$

На рис. 1 наведені графіки залежності $k_{ст}$ від величини $\Delta P_{T1}/P_T$ при різних значеннях $m_x$ та φ, отримані з використанням формули (19). Графіки побудовані для дорожнього покриття з коефіцієнтами зчеплення φ: 0,2; 0,5; 0,8.

Із розглянутих кривих слідує, що вони згруповані в три пучки, кожен з яких характеризується коефіцієнтом використання зчіпної ваги $m_x$.

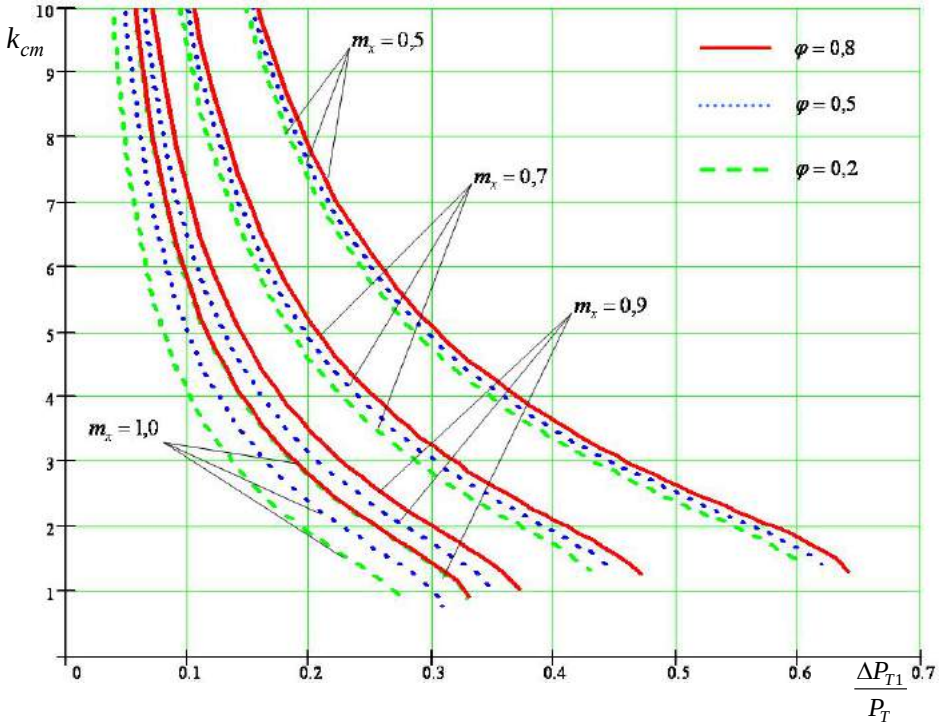


**Рис. 1. Залежність $k_{ст}$ для умовного автомобіля від відносної різниці гальмівних сил на колесах передньої осі $\Delta P_{T1}/P_T$ при різних значеннях $m_x$.**

При середніх значеннях коефіцієнта використання зчіпної ваги значення коефіцієнтна стійкості незначно відрізняється при різних значеннях коефіцієнта зчеплення.

Слід сказати, що при значеннях коефіцієнта використання зчіпної маси автомобіля менше 0,9 блокування коліс відбувається при значеннях коефіцієнта стійкості більше 1. При $m_x$ = 0,5 блокування відбудеться при $k_{ст} \approx 1{,}3$.

***Коефіцієнт стійкості автомобіля при першочерговому боковому ковзанні задніх коліс.*** В цьому випадку $(R_{yi\max})_{\min} = R_{y2\max}$ і вираз (3) буде мати вид:

$$\left(R_{yi\,\max}\right)_{\min} = \sqrt{0{,}25\varphi^2 R_{z2}{}^2 - \left(P''_{T2}\right)^2} + \\ + \sqrt{0{,}25\varphi^2 R_{z2}{}^2 - \left(P''_{T2}\right)^2 + \Delta P_{T2}\left(P''_{T2} - \Delta P_{T2}\right)}. \quad (20)$$

Коефіцієнт стійкості автомобіля:

$$k_{ст} = \frac{2L}{B}\frac{R_{y2\max}}{\Delta P_{T1} + \Delta P_{T2}}. \quad (21)$$

Після підстановки (21) в (20) и перетворювань отримаємо:

$$k_{ст} = \frac{2L}{B}\frac{\sqrt{0{,}25\varphi^2 R_{z2}{}^2 - \left(P''_{T2}\right)^2}}{\Delta P_{T1} + \Delta P_{T2}} \times \\ \times\left[1 + \sqrt{1 + \Delta P_{T2}\frac{P''_{T2} - \Delta P_{T2}}{0{,}25\varphi^2 R_{z2}{}^2 - \left(P''_{T2}\right)^2}}\right]. \quad (22)$$

Вертикальна реакція на колесах задньої осі автомобіля:

$$R_{z2} = m_a g\frac{a}{L} + m_x m_a \varphi g\frac{h}{L}, \quad (23)$$

де $a$ – відстань від передньої осі автомобіля до проекції його центру мас на горизонтальну поверхню.

Величину $P''_{T2}$ визначимо із виразу:

$$P''_{T2} = 0{,}5(1-\beta_d)m_x m_a \varphi g. \quad (24)$$

Після підстановки (23) і (24) у (22), отримаємо:

$$k_{ст} = \frac{L}{B}\frac{\sqrt{\left(\frac{a}{L} - m_x\varphi\frac{h}{L}\right)^2 - m_x^2\left(1-\beta_d\right)^2}}{\left(\Delta P_{T1} + \Delta P_{T2}\right)/\left(m_a\varphi g\right)} \times \\ \times\left[1 + \sqrt{1 + \frac{2\Delta P_{T2}}{m_a\varphi g}\cdot\frac{m_x\left(1-\beta_d\right) - 2\frac{\Delta P_{T2}}{m_a\varphi g}}{\left(\frac{a}{L} - m_x\varphi\frac{h}{L}\right)^2 - m_x^2\left(1-\beta_d\right)^2}}\right]. \quad (25)$$

Підставляючи (15) в (25), отримаємо:

$$k_{ст} = \frac{L}{B}\cdot\frac{\sqrt{\left(\frac{a}{L}\frac{1}{m_x} - \varphi\frac{h}{L}\right)^2 - \left(1-\beta_d\right)^2}}{\left(\Delta P_{T1} + \Delta P_{T2}\right)/P_T} \times \\ \times\left[1 + \sqrt{1 + 2\frac{\Delta P_{T2}}{P_T}\cdot\frac{1-\beta_d - 2\frac{\Delta P_{T2}}{P_T}}{\left(\frac{a}{L}\frac{1}{m_x} - \varphi\frac{h}{L}\right)^2 - \left(1-\beta_d\right)^2}}\right]. \quad (26)$$

Якщо різниці гальмівних сил на осях пропорціональні величинам сумарних гальмівних сил на них, то з урахуванням (18) вираз (26) матиме вид:

$$k_{ст} = \frac{L}{B}(1-\beta_d)\frac{\sqrt{\left(\frac{a}{L}\frac{1}{m_x} - \varphi\frac{h}{L}\right)^2 - \left(1-\beta_d\right)^2}}{\Delta P_{T2}/P_T} \times \\ \times\left[1 + \sqrt{1 + 2\frac{\Delta P_{T2}}{P_T}\cdot\frac{1-\beta_d - 2\frac{\Delta P_{T2}}{P_T}}{\left(\frac{a}{L}\frac{1}{m_x} - \varphi\frac{h}{L}\right)^2 - \left(1-\beta_d\right)^2}}\right]. \quad (27)$$

На рис. 2 наведені графіки залежності $k_{ст}$ від величини $\Delta P_{T2}/P_T$ при різних значеннях $m_x$, отримані з використанням формули (27).

**Висновки.**

1. Нерівномірність дії гальмівних механізмів призводить до виникнення заносу автомобіля.

2. При зменшенні значення коефіцієнта використання зчіпної ваги стійкість умовного автомобіля підвищується. Допустима відносна нерівномірність гальмівних сил передньої осі збільшується зі зменшенням коефіцієнта використання зчіпної ваги.

3. Відносна допустима нерівномірність гальмівних сил задньої осі умовного автомобіля при значенні $m_x$ = 0,5 досягає всього лиш 10%. При більших значеннях $m_x$ відбувається занос автомобіля при будь-якому значенні нерівномірності гальмівних сил.

ЛІТЕРАТУРА


1. Иларионов В. А. Эксплуатационные свойства автомобиля / В. А. Иларионов. – М. : Машиностроение, 1966. – 280 с.
2. Лебедянцев В. Г. Поперечные отклонения автомобиля при торможении : автореф. дис. на соискание науч. степени. канд. техн. наук : спец. 195 «Тракторы и автомобили» / В. Г. Лебедянцев. – Волгоград, 1969. – 22 с.
3. Косолапов Г. Исследование устойчивости автомобиля при торможении / Г. Косолапов, Л. К. Климов // Автомобильная промышленность. – 1972. – № 10. – С. 20–21.
4. Подригало М. А. Определение коэффициента устойчивости двухосного автомобиля против заноса в процессе случайного торможения / М. А. Подригало, М. В. Байцур, В. Н. Павленко // Автомобильный транспорт. – 2007. – № 20. – С. 13–15.
5. Подригало М. А. Оцінка допустимої бортової нерівномірності гальмівних сил автомобіля / М. А. Подригало, А. І. Коробко // Механіка та машинобудування. – 2008. – № 1. – С. 176–186.
6. Подригало М. А. Устойчивость колёсных машин при торможении / М. А. Подригало, В. П. Волков, В. И. Кирчатый. – Харьков : Изд-во ХГАДТУ, 1999. – 93 с.

УДК 621.432

***Эреджепов М. К.***

# ПОДДЕРЖАНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ОХЛАЖДАЮЩИХ СИСТЕМ АВТОТРАКТОРНЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ В УСЛОВИЯХ ЭКСПЛУАТАЦИИ ПУТЕМ СНИЖЕНИЯ КОРРОЗИОННО-НАКИПНОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ ОХЛАЖДАЮЩЕЙ ЖИДКОСТИ (на примере степного региона и других районов Крыма)

*У статті наданий аналіз досягнутого досвіду зниження корозійно-накипного впливу охолодних рідин на охолодну систему ДВС різного призначення. На основі аналізу визначені основні заходи щодо підтримки ефективності ОС АТД шляхом зниження корозійно-накипного впливу охолодної рідини для автотракторної техніки, експлуатованої в степовому регіоні та інших районах Криму.*

***Ключові слова:*** *автомобілі, трактори, корозія, накипні відкладення, система охолодження двигуна.*

*В статье проанализирован достигнутый опыт снижения коррозионно-накипного воздействия охлаждающих жидкостей на охлаждающую систему ДВС различного назначения. На основе анализа определены основные мероприятия по поддержанию эффективности ОС АТД путем снижения коррозионно-накипного воздействия охлаждающей жидкости для автотракторной техники, эксплуатируемой в степном регионе и других районах Крыма.*

***Ключевые слова:*** *автомобили, тракторы, коррозия, накипные отложения, система охлаждения двигателя.*

*This article analyzes the achieved experience of reducing the scaling corrosion affect of cooling liquids on the engine cooling system of various purposes. Basic actions for maintaining the efficiency of OS ATD have been analyzed and worked out by means of reducing scaling corrosion effect of cooling liquids for auto-tractor technique being used in the steppe and other regions of the Crimea.*

***Key words:*** *cars, tractors, corrosion, form sediment, system of the cooling the engine.*

**Постановка проблемы.** В жидкостных охлаждающих системах автотракторных двигателей (ОС АТД) в качестве охлаждающих жидкостей (ОЖ) применяются антифризы и вода. На эффективную работу ОС АТД в условиях эксплуатации существенное влияние оказывает коррозионно-накипное воздействие охлаждающей жидкости на теплоотдающие поверхности охлаждающей системы. Проблема усугубляется еще и тем, что в условиях эксплуатации отсут-

ствуют необходимые инструментальные методы контроля коррозионно-накипного воздействия ОЖ на детали ОС АТД.

Многолетние наблюдения эксплуатации двигателей внутреннего сгорания (ДВС) автотракторной техники в степном и других районах Крыма, анализ технического состояния деталей ОС АТД, поступающих в ремонт, в том числе и радиаторов, указывают на повышенное коррозионно-накипное воздействие охлаждающих жидкостей. В частности, это относится к двигателям СМД, МАЗ, КамАЗ, ЗИЛ.

В большей степени коррозионно-накипному воздействию подвержены теплоотдающие поверхности гильз цилиндров, головок блока, блока цилиндров, водяной насос и др. У радиаторов коррозионные образования зачастую сопровождаются закупориванием трубок продуктами коррозионно-накипных образований, выносимых охлаждающей жидкостью в верхний бачок.

**Цель работы** – изучение достигнутого опыта снижения коррозионно-накипного воздействия ОЖ на охлаждающую систему ДВС различного назначения, выделение основных мероприятий, направленных на поддержание эффективности ОС АТД в условиях эксплуатации степного и других районов Крыма.

**Изложение основного материала.** В процессе работы ДВС различного назначения в охлаждающей системе (ОС) двигателя создаются агрессивные условия, обусловленные функциональным назначением ДВС и самой ОС. Конструкции ДВС представляют собой сложную в электрохимическом отношении полиметаллическую систему, состоящую из разнородных металлов: стали, чугуна, алюминия, латуни, припой и др. При работе ДВС в ОС создаются высокие температурные и механические нагрузки, вибрация деталей, аэрация охлаждающей жидкости, перепады давления. Охлаждающая жидкость, непосредственно соприкасающаяся с рабочими поверхностями ОС АТД, выполняет свою основную функцию теплоносителя, вместе с тем является и электролитом, представляя собой постоянно функционирующий критический состав [1].

***Выбор охлаждающей жидкости*** определяется прежде всего температурным диапазоном эксплуатации автотракторной техники и находится в пределах –55 до +45°С. С этой целью предприятия-изготовители дают рекомендации по применению ОЖ для своих конструкций ДВС [2].

В последние десятилетия широкое распространение получили низкозамерзающие охлаждающие жидкости – антифризы, представляющие собой водный раствор этиленгликоля с добавленными в раствор комплекса присадок. Этиленгликоль является агрессивной жидкостью. С целью предупреждения коррозионно-накипных образований и наростов в ОС АТД в производстве антифризов [3] используется вода глубокой степени очистки, по своим свойствам близкая к дистиллированной. А в состав комплекса присадок, различных по своему назначению, входят также противокоррозионные и моющие присадки.

Наряду с антифризами в ОС АТД при положительных температурах окружающей среды в качестве основного теплоносителя используется также и вода. Вода как охлаждающая жидкость имеет ряд положительных преимуществ перед антифризами [4, 5]. Вода обладает большей теплоемкостью, теплопроводностью, она доступна, пожаробезопасна, не токсична. Вода предпочтительна в применении при высоких температурах окружающей среды (+30ºС и более), на дизелях большой мощности при эксплуатационных нагрузках близких к предельным (пропашные работы в сельском хозяйстве, работа строительно-дорожной техники и др.).

Однако накипеобразующие и коррозионные свойства природной воды ограничивают ее применение в ОС АТД. Повышенное содержание в природной воде накипеобразующих элементов: кальция, магния, коррозионно-активных ионов (хлоридов, сульфатов) приводит к интенсивному образованию коррозионно-накипных наростов на охлаждаемых поверхностях, снижению интенсивности теплоотдачи охлаждаемых поверхностей, закупориванию трубок радиатора, кавитационным, коррозионно-эрозионным разрушениям цилиндров, головок блока и др., что в целом ведет к снижению эффективности работы ОС АТД [6–10]. В связи с этим существенное значение приобретает характеристика водных источников региона, где эксплуатируется автотракторная техника.

Подземные воды степного Крыма [11], обладающие в ряде районов повышенной минерализацией (от 3–8 г/л), являются порой единственным источником для заправки ОС АТД.

Результаты анализов проб подземных и поверхностных источников водопотребления Крыма показали, что при полном благополучии в рекреационной зоне, на Южном берегу, в степной части из 3260 подконтрольных скважин более тысячи (около 40% площадей основного эксплуатационного горизонта подземных вод) имеют минерализацию более 1 г/дм$^3$, а жесткость воды в отдельных скважинах превышает 30 мг-экв./дм$^3$.

Для оценки общего характера изменения качества воды на территории полуострова была

проведена математическая обработка результатов анализов проб, отобранных из вышеуказанных подконтрольных скважин. По методу наименьших квадратов были составлены линейные уравнения зависимости общей жесткости и концентрации хлорид-ионов, сульфат-ионов от места расположения водных источников.

Решение системы линейных алгебраических уравнений позволило получить следующие линейные модели зависимостей от координат X и Y:

1) жесткость общая, мг-экв./дм$^3$:

$Z = –0,24784X + 6,3894Y – 2,4964;$

2) концентрация хлорид-ионов, мг/дм$^3$:

$Z = –63,6849X + 116,08014Y – 306,6167;$

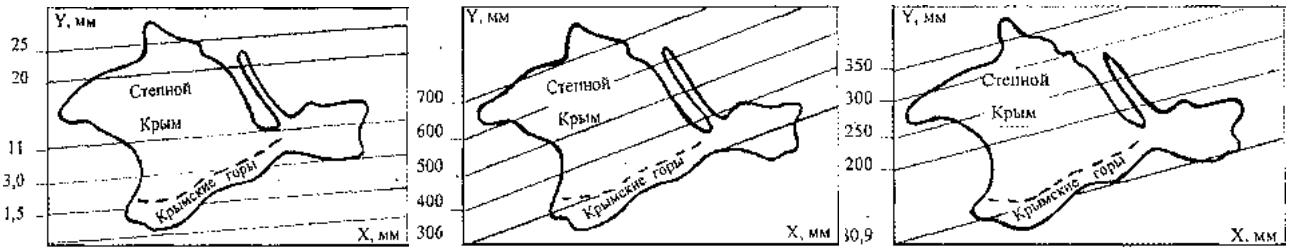
3) концентрация сульфат-ионов, мг/дм$^3$:

$Z = –17,9535X + 68,9042Y – 80,9256,$

где X, Y – декартовые прямоугольные координаты расположения водных источников, мм;

Z – значение рассеиваемого параметра.

Результаты показывают, что по всем трем показателям наблюдается устойчивая тенденция возрастания зависимости общей жесткости и концентрации хлорид-ионов, сульфат-ионов с юга на север Крыма (рис. 1).




а – жесткость общая, мг-экв./дм$^3$ б – хлорид-ионы, мг/дм$^3$ в – сульфат-ионы, мг/дм$^3$

**Рис. 1. Модели линейных зависимостей общей жесткости, концентрации хлорид-ионов, сульфат-ионов от координат X и Y.**

Таким образом, повышенная минерализация водных источников является региональной особенностью степного Крыма, которую необходимо учитывать при разработке мероприятий, направленных на повышение эффективности ОС двигателей автотракторной техники эксплуатируемой в этом регионе.

Предотвращение коррозионно-накипных образований осуществляется путем введения в подготовленную воду противонакипных и противокоррозионных присадок [6, 7].

***Предотвращение коррозионно-накипного воздействия ОЖ в ОС дизелей тепловозов, дизель-поездов и судовых дизелей.*** Рассмотрим опыт, применяемый в эксплуатации для ДВС различного назначения. В качестве охлаждающей жидкости для дизелей тепловозов, дизель-поездов [12, 13] и судовых дизелей [14], где вода является основным теплоносителем, корректирование качества охлаждающей воды производится в два этапа.

На первом этапе выбирается или производится глубокая очистка воды, качество которой определяется показателями, приведенными в табл. 1, 2.

На втором этапе в очищенную воду для дизелей тепловозов, дизель-поездов вводят химические реагенты (присадки) в необходимом количестве (табл. 1). Для ОС дизелей судов в очищенную воду вводят водоэмульсионные присадки или присадки иностранного производства (ФРГ). Предельные показатели качества охлаждающей воды для ОС судовых дизелей в процессе эксплуатации приведены в табл. 3.

**Таблица 1.**

**Нормы качества очищенной воды и перечень добавляемых присадок, используемых для дизелей тепловозов, дизель-поездов.**

| Показатели качества очищенной воды | мг-экв./л | Наименование добавляемых присадок |
|---|---|---|
| общая жесткость | 0,2 | **-каустическая сода** (NaOH), ГОСТ 2253-79;<br>**-тринатрийфосфат** ($Na_3PO_4 \times 12H_2O$), ГОСТ 201-76;<br>**-хромпик** ($K_2CrO_7$, $Na_2Cr_2O_7 \times 2H_2O$), ГОСТ 2652-78, 2651-78;<br>**-силикат натрия** ($Na_2SiO_3$) ГОСТ 13078-81;<br>**-хромовый ангидрит** ($CrO_3$) ГОСТ 2648-78 |
| содержание хлоридов | 10 | |
| общая щелочность | 0,6 | |
| сухой остаток | 50 | |

**Таблица 2.**

**Нормы качества пресной воды.**

| Тип дизеля | Наименование добавляемых присадок | |
|---|---|---|
| | Хлориды, мг/л | Жесткость общая, мг-экв./л |
| 6Д50 М | 15,0 | 0,15 |
| Все остальные двигатели | 50,0 | 0,5 |

**Таблица 3.**

**Предельные показатели качества охлаждающей воды.**

| Тип дизеля | Хлориды, мг/л, не более | Жесткость, мг-экв./л, не более | Содержание присадки, % |
|---|---|---|---|
| 6Д50; 650-VBF 90; 8TD-48 | 100 | 1,5 | 0,5 ±0,2 |
| 8NVD-48A2U; 8NVD-48AU | 150 | 1,5 | 0,5 ±0,2 |
| Все остальные | 200 | 3,0 | 0,5 ±0,2 |

Представляет интерес присадка ИНКОРТ-8М3 [15], применяемая для ДВС тепловозов и дизель-поездов, рекомендованная также к применению в ОС большегрузных самосвалов БелАЗ и ОС АТД. При использовании данной присадки, жесткость исходной воды для ДВС тепловозов и дизель-поездов допускается до 4 мг-экв./л, жесткость исходной воды для ОС АТД допускается до 8 мг-экв./л.

К положительным свойствам присадки ИНКОРТ-8М3, применительно к возможности использования в ОС АТД, относятся:

- жесткость исходной воды допускается до 8 мг-экв./л;
- предельное содержание Cl-ионов в исходной воде допускается до 400 мг/дм$^{3;}$
- одинаково эффективно защищает черные и цветные металлы;
- растворимость присадки в воде неограниченная, без дополнительного подогрева;
- расход концентрата присадки составляет 2 литра на 100 литров исходной воды;
- пожаровзрывобезопасна, не содержит хроматов, нитритов, канцерогенных веществ, относится к третьему классу опасности по ГОСТ 12.1.007-76;
- подвергается регенерации;
- простота в применении, не требуется специального технологического оборудования и высокой квалификации обслуживающего персонала.

Для решения возможности применения данной присадки для ОС АТД необходимо исследовать ее эффективность на различных двигателях автотракторной техники.

Контроль качества охлаждающей воды ДВС тепловозов и дизель-поездов, судовых дизелей осуществляется химическими лабораториями, входящими в состав служб эксплуатации.

Таким образом, предотвращение коррозионно-накипных образований в ОС дизелей тепловозов, дизель-поездов и судовых дизелей осуществляется комплексно и включает в себя три основных этапа:

- выбор или подготовку исходной воды по показателям, приведенным в табл. 1, 2, 3;
- добавление в исходную воду присадок, предотвращающих коррозионно-накипные образования (табл. 1, 3);
- контроль химического состава охлаждающей жидкости в процессе приготовления и работы дизеля.

***Пути снижения коррозионно-накипного воздействия в ОС АТД при использовании воды в качестве основного теплоносителя.*** При использовании воды как основного теплоносителя в ОС АТД больше заботятся о предотвращении образования накипи [16]. Вместе с тем природная вода проявляет значительную химическую активность, вызываемую содержанием в ней хлоридных, сульфатных и гидрокарбонатных анионов. Концентрация хлорид-ионов свыше 100 мг/дм$^3$ препятствует образованию защитных слоев металла и интенсифицирует коррозию, а сульфат-ионов свыше 200 мг/дм$^3$ ускоряет процесс коррозии [17].

К основным показателям, характеризующим качество исходной воды для ОС АТД, относят содержание в воде растворимых солей Ca и Mg, концентрацию ионов Cl и $SO_4$, уровень pH и др. В табл. 4 приведены данные об установлении режима технического обслуживания в зависимости от жесткости воды [4].

**Таблица 4.**

**Установление режима технического обслуживания в зависимости от жесткости воды.**

| Группы жесткости | Общая жесткость, мг·экв./л | Влияние накипеобразования |
|---|---|---|
| Очень мягкая вода | До 1,5 | Накипь не образует |
| Мягкая | 1,5–4,0 | Накипь почти не образует |
| Средне-жесткая | 4,0–8,0 | Образует накипь, которую не реже двух раз в год необходимо удалять |
| Жесткая | 8,0–12,0 | Без предварительного умягчения не применять |
| Очень жесткая | Более 12,0 (море до 75, океан до 130) | Без умягчения не применять |

***При использовании антинакипинов*** в жесткую воду добавляют различные противонакипные присадки: гексаметафосфат натрия $(NaPO_3)_6$, тринатрийфосфат, суперфосфат $[Ca(H_2PO_4)_4]$, хромпик – двухромовокислый калий $(K_2Cr_2O_7)$ и др. [7].

При данной обработке не удаляются из воды коррозионно-активные ионы Cl и $SO_4$, что является главным недостатком этого метода. Кроме того, применение антинакипинов требует специальных мер предосторожности. Хромпик, к примеру, по степени воздействия на организм относится к веществам 1-го класса опасности.

***Снижение коррозионного воздействия на детали ОС АТД оказывает применение водоэмульсионных присадок*** НГ-203, НГ-212, НГ-203А, экстрол и др., добавляемых в исходную жесткую воду в количестве 1–1,5% [18]. По данным [19], присадки на масляной основе способны образовывать теплоизолирующую пленку, уменьшая теплоотвод от охлаждаемых поверхностей, толщина которой в течение 500–1000 часов работы дизеля может достигать 0,3–0,5 мм. В ней под действием высокой температуры (выше 170ºС) в результате каталитического действия металлической поверхности развиваются деструктивные процессы с образованием продуктов уплотнения, способствующих возникновению перегревов дизелей. Кроме того, масляные присадки расслаиваются под воздействием жесткой воды.

Учитывая специфику условий эксплуатации автотракторной техники, а также доступность, нетоксичность, дешевизну водоэмульсионных охлаждающих жидкостей, их применение в ОС АТД представляется предпочтительным. При этом требуют уточнения вопросы концентрации присадки в исходной воде, вызывающие сворачиваемость и образование продуктов уплотнения.

***Методы обработки химическими реагентами,*** широко распространенные в теплоэнергетическом хозяйстве, также рекомендованы для использования в практике водоподготовки для ОС АТД. К затруднениям в применении данного метода следует отнести организацию специализированного участка с соответствующим технологическим оборудованием, реагентным хозяйством, лабораторными приборами контроля качества и др.

***При катионовом методе водообработки*** накипеобразующие ионы кальция и магния, содержащиеся в обрабатываемой жесткой воде, заменяются на ионы натрия. К недостатку данного метода следует отнести то, что обработанная вода не очищается от коррозионно-образующих элементов $Cl^-$ и $SO_4^{2-}$.

***Метод магнитной обработки*** широко применяется в теплоэнергетике. Данный метод предотвращает накипеобразования, обусловленные кальциевой и карбонатной жесткостью [20]. При магнитной обработке воды накипеобразователи не удаляются, а оседают на рабочих поверхностях и выделяются в объеме воды в виде взвешенных частиц, при этом не удаляются также и коррозионнообразующие элементы.

Механизм действия магнитной обработки воды к настоящему времени раскрыт недостаточно, что связано с освоением лишь отдельных сторон и возможностей этого метода.

Повышенная минерализация водных источников степного Крыма требует специальных мер при решении проблем поддержания эффективности ОС АТД, эксплуатируемых в этом регионе. Целесообразен опыт региональной климатической модификации ДВС [21], т. е. когда встраиваемый в ДВС модуль нейтрализует или снижает характерные региональные негативные воздействия на двигатель.

Авторами [22, 23] ***предложены схемы внутридвигательной водоподготовки***, представляющие собой дополнительные модули, установленные к примеру на *V*-образном восьми цилиндровом двигателе.

Основу модулей (рис. 2, 3) представляют катионит-анионитовые фильтры 4, 5, очищающие природную воду от накипеобразующих ионов (кальция, магния) и ионов, вызывающих коррозию (хлоридов, сульфатов).

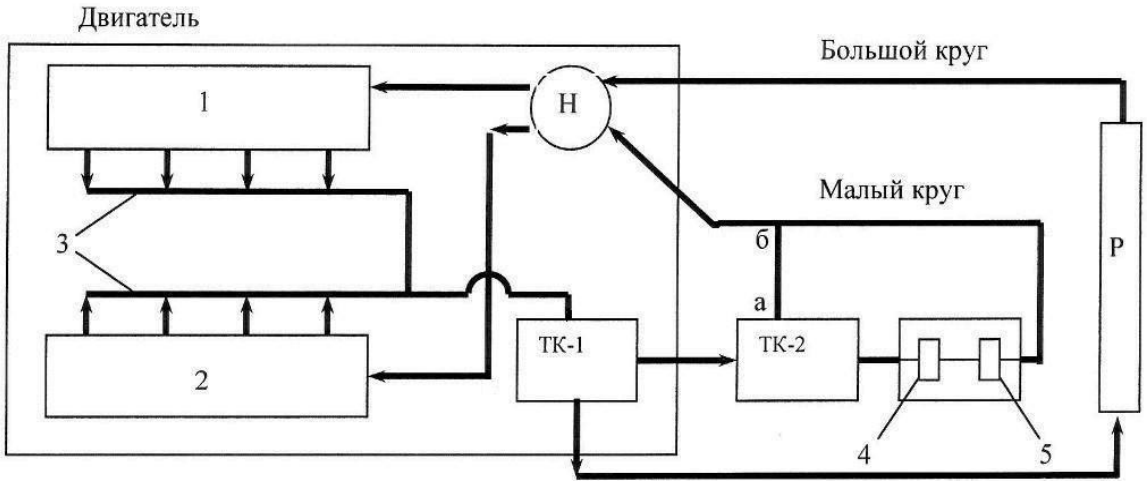


**Рис. 2. Последовательное включение модуля в контур охлаждения ДВС.**

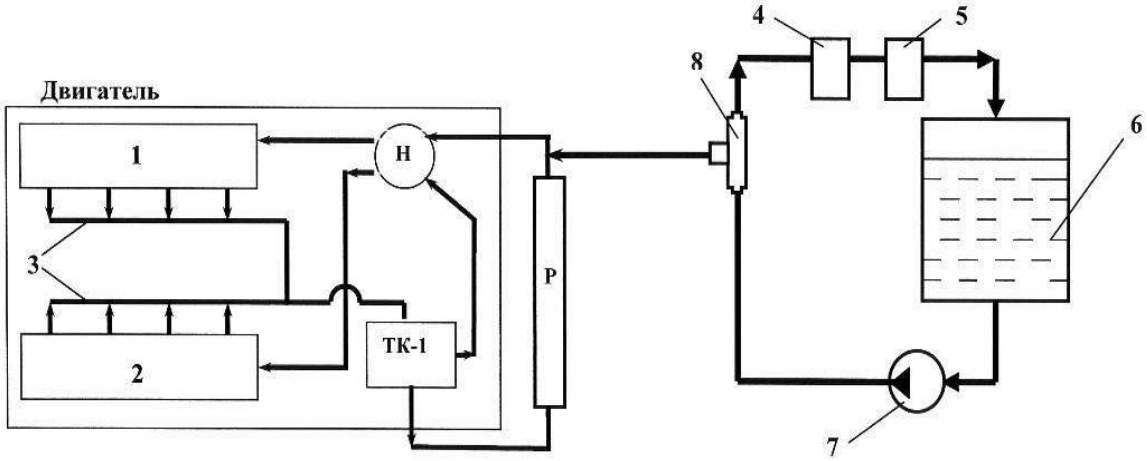



**Рис. 3. Параллельное включение модуля в контур охлаждения ДВС: 1, 2 – головки блока; 3 – выходные трубопроводы ОС; 4 – фильтр катионитный; 5 – фильтр анионитный; 6 – емкость для воды; 7 – электронасос; 8 – трехходовой кран; Н – насос водяной; ТК-1 – штатная термостатная коробка двигателя; ТК-2 – дополнительный термостат; Р – штатный радиатор двигателя.**

На рис. 2 очистительный контур с ионитовыми фильтрами включен последовательно с контуром охлаждения двигателя. Очистка воды от природных ионов производится во время прогрева двигателя при циркуляции охлаждающей воды по малому кругу. Для предохранения анионитов от разрушения при высокой температуре охлаждающей воды предусмотрена «защита» в виде доработанного термостата ТК-2, отключающего фильтры 4, 5 при достижении температуры 60°С.

На рис. 3 очистительный контур модуля состоит из катионит-анионитового фильтра 4, 5, емкости для воды 6, объемом не менее объема ОС АТД, электронасоса 7, трехходового крана 8.

Очистка воды производится при циркуляции жидкости по замкнутому контуру модуля: емкости для воды 6 – электронасоса 7 – трехходового крана 8 – ионитных фильтров 4, 5. При этом контур охлаждения двигателя и очистительный модуль разъединены трехходовым краном. Для заправки системы охлаждения очищенной водой, трехходовым краном 8 очистительный модуль соединяется с системой охлаждения двигателя. Подача очищенной воды осуществляется электронасосом 7. Положительной стороной данного модуля (рис. 2) является возможность добавления присадок в воду, циркулирующую в системе охлаждения.

Для возможности применения приведенных модулей в практике эксплуатации ОС АТД необходимо провести исследования, связанные с отработкой оптимальных режимов очистки воды и определения оптимальных геометрических размеров катионит-анионитовых фильтров.

Представляют интерес ***фильтры для постоянной очистки и корректирования качества ОЖ***, подключаемые в систему охлаждения автомобильных двигателей [24].

Магнитный фильтр, включаемый параллельно к циркуляционной системе ОС, очищает жидкость от взвешенных частиц продуктов коррозии [25].

Фильтр охлаждающей жидкости [26] (рис. 4) используется в системах охлаждения двигателей грузовых автомобилей и тяжёлых машинах, функционирует в системе охлаждения двигателя в качестве обводного фильтра, через который проходит только небольшая часть охлаждающей жидкости.

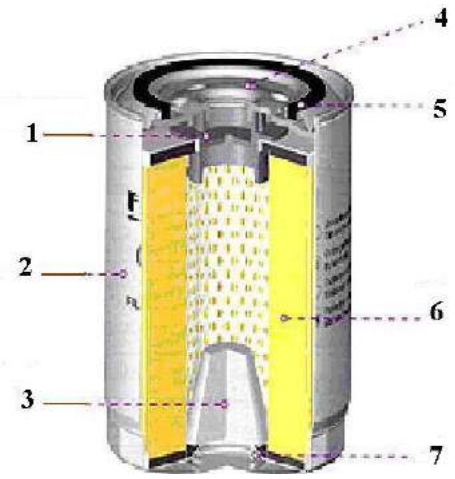



**Рис. 4. Фильтр охлаждающей жидкости: 1 – обратный клапан; 2 – корпус; 3 – кубик активного вещества; 4 – крышка; 5 – уплотнитель; 6 – фильтрующий элемент; 7 – прижимная пружина.**

Фильтры этого типа снабжены элементом для очистки охлаждающей жидкости от твердых механических частиц – загрязнений, проникающих снаружи и образующихся внутри системы охлаждения двигателя. Кроме того, фильтры содержат комбинацию химических веществ, предохраняющих металлические поверхности

системы охлаждения от коррозии и эрозии, вызванной кавитацией. Эти вещества, постепенно растворяясь в проходящей через фильтр охлаждающей жидкости, стабилизируют её водородный показатель pH и жёсткость, корректируя, таким образом, качество охлаждающей воды.

Фильтры механической очистки [27] (рис. 5) представляют собой сетчатый фильтр цилиндрической формы с размером ячейки 1 мм, устанавливается в патрубок верхнего бачка радиатора. Данный фильтр предохраняет трубки радиатора от закупоривания продуктами коррозионно-накипных образований системы охлаждения, но не предохраняет ОС АТД от коррозионно-накипного воздействия ОЖ.

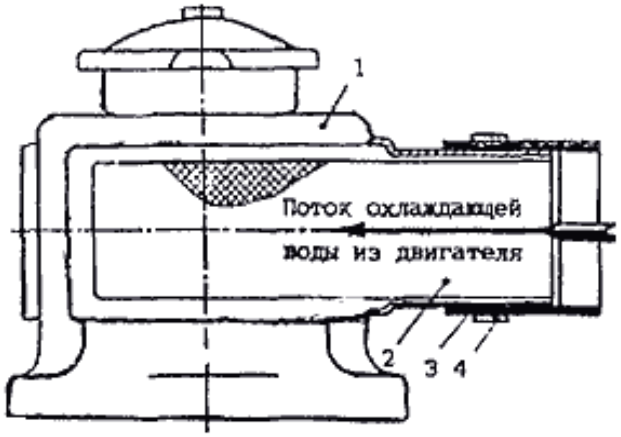



**Рис. 5. Схема установки сетчатого фильтра в радиатор автомобиля: 1 – верхний бачок радиатора; 2 – сетчатый фильтр; 3 – резиновый патрубок; 4 – стяжной хомут.**

Таким образом, используемые на практике и предложенные исследователями методы корректирования качества охлаждающей воды для применения в ОС АТД осуществляются различными способами:

- применением антинакипинов;
- применением водоэмульсионных присадок;
- обработкой химическими реагентами;
- катионовым обменом;
- магнитной обработкой;
- внутридвигательной водоподготовкой;
- корректированием качества охлаждающей жидкости непосредственно в самой ОС АТД;
- установкой механических фильтров в патрубок верхнего бачка радиатора.

Рассмотренные методы корректирования качества ОЖ, где вода является основным теплоносителем, обладают определенными преимуществами и недостатками, которые необходимо учесть в дальнейшей разработке путей повышения эффективности ОС АТД применительно к степному региону и др. районов Крыма.

***Для ОС АТД, использующих антифризы,*** корректирования качественного состава антифризов в условиях эксплуатации не предусматривается. В соответствии с инструкциями по эксплуатации каждая марка антифриза имеет свой предельный срок использования, определяемый от 2 до 5 лет. Следует отметить, что к настоящему времени в условиях эксплуатации методы инструментального определения коррозионного воздействия антифризов на детали ОС АТД не применяются.

Актуальность определения коррозионного воздействия антифризов [1] диктуется преждевременной потерей противокоррозионных свойств, наличием на рынке антифризов продукции, не соответствующей техническим условиям, и рядом других причин эксплуатационного характера. Данная проблема требует также своего решения.

***Контроль коррозионно-накипного воздействия охлаждающей жидкости на ОС АТД.*** В практике эксплуатации ДВС судов, тепловозов и дизель-поездов контроль коррозионно-накипного воздействия ОЖ на ОС дизелей осуществляется через проверку химического состава исходной воды по показателям, приведенным в табл. 1, 2, 3 и определения концентрации присадок лабораторными методами. При известном химическом составе присадок проверяется и при необходимости корректируется их концентрация в ОЖ.

На предприятиях и хозяйствах автотракторной техники контроль коррозионно-накипного воздействия охлаждающих жидкостей на ОС АТД традиционными лабораторными методами, применяемыми для ДВС судов, тепловозов и дизель-поездов, неприемлемы. А для антифризов ОС АТД зачастую не известен химический состав и концентрация присадок.

К настоящему времени в энергетической промышленности широкое распространение получили компактные электронные приборы экспресс-контроля качества технологических жидкостей по показателям общей минерализации, жесткости, электропроводности, pH и др.

Также накоплен опыт применения компактных коррозиметров, осуществляющих автоматическое определение показателей общей и питинговой коррозии в различных электропроводящих технологических средах.

Использование названных приборов в технологии инструментального контроля коррозионного воздействия позволит существенно улучшить качество обслуживания в решении проблем снижения коррозионно-накипных образований по поддержанию эффективности ОС АТД.

**Выводы и рекомендации.** Проведенный анализ литературных источников позволяет вы-

делить основные этапы, направленные на поддержание эффективности работы ОС АТД путем снижения коррозионно-накипного воздействия охлаждающей жидкости.

1. При использовании антифризов необходимо проверять качество на коррозионное воздействие перед заливкой в ОС АТД, так и в процессе эксплуатации ДВС с определенной периодичностью, методами инструментального экспресс-контроля.

2. При использовании ОЖ, где вода является основным теплоносителем, необходимо выполнять в комплексе следующие мероприятия:

- качество исходной воды по своим свойствам должна быть близка к качеству дистиллированной воды;
- для предотвращения коррозионно-накипного воздействия на ОС АТД в исходную воду необходимо добавлять присадки;
- в процессе подготовки ОЖ и работы ДВС необходимо контролировать коррозионно-накипное воздействие ОЖ методами инструментального экспресс-контроля.

3. Учитывая повышенную минерализацию водных источников степного Крыма, также специфику работы сельскохозяйственной техники, провести исследования, разработать и внедрить компактный мобильный модуль водоподготовки, входящий в состав ОС АТД.

4. Для сравнительной оценки эффективности защиты от коррозионного воздействия ОЖ на детали ОС АТД провести исследования с различными ингибиторами и выработать рекомендации по их применению.

5. Провести исследования методов инструментального экспресс-контроля по определению коррозионного-накипного воздействия ОЖ на детали ОС АТД с целью внедрения в автотракторного хозяйства.

ЛИТЕРАТУРА


1. Бейнон Е. Коррозия системы охлаждения, обусловленная ее конструкцией и применяемыми материалами / Е. Бейнон, Н. Р. Кулер, Х. Дж. Хенигэн ; [пер. с англ. В. В. Михеевой] // Предотвращение коррозии автомобилей : сб. статей. – М. : Транспорт, 1983. – С. 90–185.
2. Промышленные силовые машины [Электронный ресурс] – Режим доступа : http://www.powerunit.ru/service_antifreez_yamz.htm
3. Охлаждающие жидкости. ВАМП [Электронный ресурс] – Режим доступа : http://www.vamp.ua/info/?view=12
4. Итинская Н. И. Автотракторные эксплуатационные материалы / Н. И. Итинская, Н. А. Кузнецов. – М. : Высшая школа, 1978. – 232 с.
5. Покровский Г. П. Топливо, смазочные материалы и охлаждающие жидкости / Г. П. Покровский. – М. : Машиностроение, 1985. – 300 с.
6. Моисеев А. Ф. Предупреждение образования накипи в автомобильных двигателях / А. Ф. Моисеев. – М. : Транспорт, 1971. – 128 с.
7. Бурков В. В. Эксплуатация автомобильных радиаторов / В. В. Бурков. – М. : Транспорт, 1975. – 80 с.
8. Chen Hua. Measures of the fight with postponing the salts in system of the cooling / Chen Hua, Fan Lu-John, Yan Jun // The Power Engineering Company. The Second Cotton Group of Nantong. – 2002. – № 3. – P. 54–56.
9. Шадыев С. Н. Повышение эффективности систем охлаждения двигателей путем предотвращения забиваемости трубок радиатора продуктами коррозионно-накипных образований с целью увеличения производительности сельскохозяйственных тракторов в условиях сухого жаркого климата: автореф. дис. на соискание степени канд. техн. наук : спец. 05.20.03 / С. Н. Шадыев. – СПб. – Пушкин, 1991. – 17 с.
10. Авлиякулов Н. Н. Улучшение эксплуатационных показателей тракторов и автомобилей в природно-агрессивных условиях аридного климата на основе адаптации охлаждающей системы двигателей: автореф. дис. на соискание степени докт. техн. наук : спец. 05.20.03 / Н. Н. Авлиякулов. – СПб. – Пушкин, 1994. – 41 с.
11. Абдулгазис У. А., Эреджепов М. К., Шамилев Т. М. О необходимости адаптации охлаждающих систем автотракторных двигателей к природно-агрессивной воде (на примере степного Крыма) // Материалы третьего конгресса двигателестроителей Украины с иностранным участием «Прогресс – Качество – Технология». – Киев – Харьков – Рыбачье, 1998. – С. 544–546.
12. Технология безопасной эксплуатации и ремонта подвижного состава промышленного железнодорожного транспорта. – М., 2001. – 183 с.
13. Інструкція по приготуванню та застосуванню води для охолодження двигунів тепловозів і дизельпоїздів. ЦТ-0047. – К., 2002. – 48 с.
14. Правила технической эксплуатации судовых дизелей. Утверждены приказом Госкомрыболовства России от 5 мая 1999 г., № 107. – 114 с.
15. Антикоррозионные присадки к воде [Электронный ресурс] – Режим доступа : http://www.himvirial.ru
16. Гурвич И. Б. Эксплуатационная надежность автомобильных двигателей / И. Б. Гурвич, П. Э. Сыркин. – М. : Транспорт, 1984. – 144 с.
17. Стрижевский И. В. Защита подземных металлических сооружений от коррозии: справочник / И. В. Стрижевский. – М. : Стройиздат, 1990. – 303 с.
18. Гуреев А. А. Средства защиты автомобилей от коррозии / А. А. Гуреев, Ю. Н. Шехтер, И. А. Тимохин. – М. : Транспорт, 1983. – 144 с.
19. Безюков О. К. Повышение эффективности охлаждения судовых ДВС путем воздействия на физико-химические свойства жидкости / О. К. Безюков, В. А. Жуков, О. В. Жукова // Двигатели внутреннего сгорания. – 2007. – № 2. – С. 122–126.
20. Кострикин Ю. М. Водоподготовка и водный режим энергообъектов низкого и среднего давления / Ю. М. Кострикин, Н. А. Мещерский, О. В Коро-

вина : справочник. – М. : Энергоатомиздат, 1990. – 254 с.
21. Конструктивные отличия и особенности технической эксплуатации ДВС в условиях стран Азии, Африки и Латинской Америки. Основы климатической приспособленности ДВС. – Часть 1 / [под ред. А. Ф. Шеховцова]. – К.: УМК, ВО, 1988. – 236 с.
22. Абдулгазис У. А., Эреджепов М. К., Шамилев Т. М. Адаптация охлаждающих систем автотракторных двигателей к природно-агрессивной воде степного Крыма // Материалы четвертого конгресса двигателестроителей Украины с иностранным участием [«Прогресс – Качество – Технология»]. – Киев – Харьков – Рыбачье, 1999. – С. 523–527.
23. Пат. 51345 Україна, МПК 6 F 01 P 3/12. Система охолодження двигуна внутрішнього згорання / Абдулгазіс А. У., Абдулгазіс У. А. (Україна); заявник та патентовласник А. У. Абдулгазіс, У. А. Абдулгазіс. – заявл. 26.02.2002 ; опубл. 15.11.2002, Бюл. № 11. – 4 с.
24. Путилин А. В. Направление развития систем жидкостного охлаждения современных автомобильных двигателей / А. В. Путилин, А. Г. Драгомиров, И. А. Поверинов // Фундаментальные и прикладные проблемы совершенствования поршневых двигателей : материалы IX Международной научно-практической конференции, Владимир 27–29 мая. – Владимир : Посад, 2003. – С. 278–281.
25. Гаврилов А. К. Фильтрация жидкости в охлаждающей системе дизеля / А. К. Гаврилов // Двигателестроение. – 1985. – № 7. – С. 54–56.
26. Продукция Filtron. Фильтры системы охлаждения [Электронный ресурс] – Режим доступа : http://filtron.ua/index.php?pageid=12
27. Антропов Б. С. Защита радиаторов систем охлаждения двигателей от накипи и коррозии / Б. С. Антропов, М. Я. Яновский, Д. А. Нестеров // Тракторы и сельскохозяйственные машины. – 2007. – № 7. – С. 49–50.

# РАЗДЕЛ 3. СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННОЕ МАШИНОСТРОЕНИЕ

УДК 621:631.316

**Бабицкий Л. Ф., Кувшинов А. А., Тарасенко В. И.**

## ОБОСНОВАНИЕ ФОРМЫ ОПОРНО-ПРИКАТЫВАЮЩИХ УСТРОЙСТВ ЗЕРНОВЫХ СЕЯЛОК

*Для підвищення врожайності сільськогосподарських культур запропоновано використовувати опорно-притискні пристрої в зернових сівалках. Це дозволить забезпечити укладання насіння в щільніше ложе і хороший контакт їх з ґрунтом.*

***Ключові слова:*** *ґрунт, коток, зернова сівалка.*

*Для повышения урожайности сельскохозяйственных культур предложено использовать опорно-прикатывающие устройства в зерновых сеялках. Это позволит обеспечить укладку семян в более плотное ложе и хороший контакт их с почвой.*

***Ключевые слова:*** *почва, каток, зерновая сеялка.*

*For the increase of the productivity of agricultural cultures it is suggested to utillize support-riderup devices in corn sowing machine. It will allow to provide piling of seed in more dense bed and good contact them with soil.*

***Key words****: soil, skating rink, corn sowing machine.*

**Постановка проблемы.** При посеве зерновых культур, особенно в районах с недостаточным количеством осадков, одним из основных агротехнических требований является укладка семян на уплотненное ложе.

**Анализ литературы.** Главный недостаток конструкции высевных секций зерновых сеялок – нестабильная глубина хода сошника из-за отсутствия ограничивающих устройств и значительно изменяющихся физико-механических свойств почвы на поверхности поля [1].

Существующие сеялки с дисковыми сошниками в полной мере не обеспечивают выполнение этого требования. Всхожесть посеянных семян такими сеялками в засушливые периоды очень низкая. Возникает необходимость уплотнения почвы впереди дисковых сошников, так как поверхностная обработка культиваторами оставляет рыхлую почву [2].

**Цель статьи** – теоретически обосновать форму катка в виде деформатора с коническим сечением в поперечном направлении для подготовки уплотненного ложа почвы впереди каждого дискового сошника.

**Изложение основного материала.** Такая форма катка подтверждается теоретическими основами распределения контактных давлений при взаимодействии конического деформатора с почвой. В общей постановке взаимодействие катка клиновидного сечения с почвой можно описать уравнением плоской контактной задачи:

$$\int_{-a}^{a} P(t)\ln\frac{1}{|t-x|}dt = f(x), \text{ при } -a \le x \le a, \qquad (1)$$

где $P(t)$ – распределение давления по участку контакта катка с почвой;

$$f(x) = \frac{C - f_1(x) - f_2(x)}{v},$$

где $v$ – деформационный показатель почвы;

$f_1(x)$ – функция, описывающая форму катка $f_1(x) = |x|\text{ctg}\beta$ (см. рис. 1).

$f_2(x)$ – функция, описывающая поверхность почвы, и с учетом допущений принимается в виде линейной деформируемой полуплоскости, то есть $f_2(x) = 0$.

При этих условиях [3] для гладкого катка клиновидной формы поперечного сечения решение уравнения (1) дает закономерность распределения давления по участку контакта клиновидного катка с почвой в виде выражения:

$$P(x) = -\frac{P}{\pi a}\ln\frac{a - \sqrt{a^2 - x^2}}{|x|}, \qquad (2)$$

где $P$ – сила давления катка на почву; $P = mg$, где $m$ – масса катка.

Из приведенной на рис. 1 эпюры видно, что давление на краях участка контакта равно нулю, а в вершине клина развивается максимальное давление.

В зерновой сеялке дисковые сошники будут проделывать борозду для семян в уплотненной почве впереди идущим катком клиновидной формы сечения, что обеспечит укладку семян в более плотное ложе и хороший контакт их с почвой. Укладка семян в плотное ложе создает хорошие условия для их произрастания и развития.

Конструкцией предусмотрено регулировка опорно-прикатывающего катка, что дает возможность обеспечить стабильность хода по глубине.

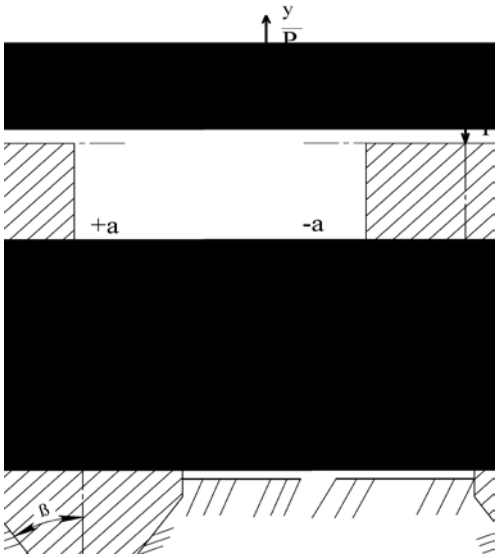



**Рис. 1. Распределение контактных давлений под катком с клиновидной формой поперечного сечения.**

На рис. 2 схематично представлен сошник сеялки, который включает корпус 1 сошника, семяпровод 2, поводок 8, стальные диски 3, направитель семян 4, опорно-прижимной каток 5, расположенный сзади сошника.

Спереди сошника установлен подпружиненный бороздоформирующий ролик 6 с выпуклой образующей 7 треугольной формы. Бороздоформирующий ролик 6 подпружинен пружиной 9, относительно поводка 8.

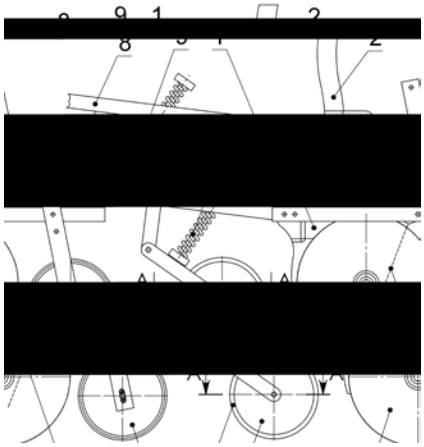



**Рис. 2. Схема секции зерновой сеялки.**

Предлагаемая конструкция работает следующим образом. При перемещении агрегата с сеялкой по полю первым контактирует с почвой бороздоформирующий ролик 6, выравнивая участок почвы в направлении движения сеялки.

Пружина 9 прижимает его к почве с усилием, которое раздавливает или отклоняет комья почвы с пути движения дисков 3 сошника.

Выпуклая образующая 7 ролика 6 продавливает в почве канавку в продольном направлении, по которой дискам сошника значительно легче создать ровную борозду для семян, по направлению движения агрегата и обеспечить стабильную глубину, что значительно улучшает качество высева семян.

Опорно-прижимной каток 5, установленный сзади сошника, контактирует с выровненной роликом 6 участком почвы, что ограничивает отклонение от заданной глубины хода сошника и способствует улучшению качества высева семян.

**Вывод.** Использование предложенного устройства позволяет повысить качество высева семян за счет более точного их расположения по глубине и прямолинейности рядка.

ЛИТЕРАТУРА

1. Карпенко А. Н. Сельскохозяйственные машины: учебник [для студ. высш. с.-х. учеб. завед.] / А. Н. Карпенко, В. М. Халанский. – 5-е изд., перераб. и доп. – М. : Колос, 1983. – 495 с.
2. Лурье А. Б. Расчет и конструирование сельскохозяйственных машин: учебник [для студ. высш. с.-х. учеб. завед.] / А. Б. Лурье, А. А. Громбчевский. – Л. : Машиностроение., 1977. – 528 с.
3. Бабицький Л. Ф. Біонічні напрями розробки ґрунтообробних машин / Леонід Федорович Бабицький. – К. : Урожай, 1998. – 164 с.

УДК 621:631.313

**Балко В. В., Куклин В. А., Котелевич К. П.**

# ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ ОБОСНОВАНИЕ ПАРАМЕТРОВ ВИБРОУДАРНОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ КУЛЬТИВАТОРНЫХ ЛАП НА ПОЧВУ

*Розглянуто процес дії на ґрунт комбінованого віброударного робочого органу культиватора, що забезпечує зниження тягового опору і підвищення якісних показників обробітку ґрунту. Приведено теоретичне обґрунтування основних параметрів.*

***Ключові слова:*** *культиваторна лапа, обробіток ґрунту, віброударна дія, тяговий опір, якість обробітку.*

*Рассмотрен процесс воздействия на почву комбинированного виброударного рабочего органа культиватора, который обеспечивает снижение тягового сопротивления и повышение качественных показателей обработки почвы. Приведено теоретическое обоснование основных параметров.*

***Ключевые слова:*** *культиваторная лапа, обработка почвы, виброударное воздействие, тяговое сопротивление, качество обработки.*

*The construction of combined percussive working body of cultivator is developed, which provides the decline of tractive resistance and increase of quality indicators of tillage. The theoretical substantiation of key parameters is resulted.*

***Keywords:*** *cultivator paw, tillage, impact, tractive resistance, processing quality.*

**Постановка проблемы.** На современном этапе конструирования почвообрабатывающих машин одной из важных задач является применение оптимального привода с низкими энергозатратами. В сочетании с универсальными рабочими органами, обеспечивающими качественную обработку почвы, проектируемые агрегаты позволят выполнять комплекс необходимых агротехнологических мероприятий в сжатые сроки. Поэтому одним из перспективных направлений развития почвообрабатывающих машин является использование вибрационных рабочих органов.

**Анализ исследований и публикаций** показал, что вибрационную почвообрабатывающую технику можно классифицировать следующим образом:

а) по способу передачи энергии к сельскохозяйственной машине: энергосберегающий (рабочий орган приводится в колебательное действие путем преобразования сцепления со стороны почвы); энергетический (принудительный привод от внешнего энергоисточника); комбинированный (сочетание энергосберегающего и энергетического способов);

б) по используемым почвообрабатывающим машинам: плуги, культиваторы, чизели, щелеватели, струги, плоскорезы;

в) по способам подачи колебаний в конструкциях: к отдельному рабочему органу; к раме;

г) по направлению колебаний рабочего органа: колебания в горизонтальной плоскости [1]; колебания в вертикальной плоскости [2]; смешанные.

**Цель статьи** – обоснование параметров виброударного воздействия на почву комбинированного виброударного рабочего органа культиватора.

**Изложение основного материала.** На основании проведенного анализа рассмотрен процесс воздействия на почву комбинированного виброударного рабочего органа культиватора (рис. 1), который дает возможность адаптировать его к обработке разных типов почв при отсутствии необходимости подвода энергии от внешних источников.

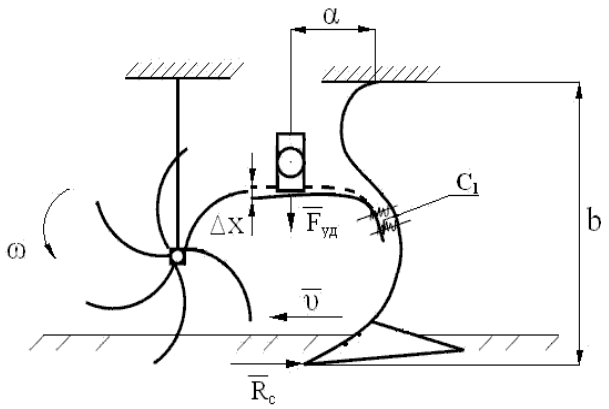



**Рис. 1. Схема силового воздействия на почву виброударного рабочего органа культиватора.**

Частота воздействия колебаний регулируется изменением скорости движения агрегата и количеством игл приводного диска. Изменение амплитуды колебания стойки культиваторной лапы регулируется массой груза в стакане и усилием отжатия упругого элемента $C_1$.

Переменную составляющую силы сопротивления почвы запишем в виде $R_C = R_{max}\sin\omega t$. Периодически действующую ударную нагрузку представим как некоторую функцию от времени $F_{уд} = f(t)$.

Эквивалентная ударная сила, приведенная к оси вращения, будет иметь следующий вид:

$$F_{\text{уд}}^{\text{пр}} = \frac{a}{b} F_{\text{уд}}, \qquad (1)$$

где $a$ и $b$ – расстояния до оси вращения.

Запишем уравнение движения стойки культиваторной лапы под действием этих сил:

$$m\ddot{x} = -R_c - F_{\text{уд}}^{\text{пр}}, \qquad (2)$$

где $m$ – приведенная масса стойки,

$$m\ddot{x} = -R_{\max} \cdot \sin\, \omega t - \frac{a}{b} \cdot F_{\text{уд}}. \qquad (3)$$

Период оборота ($T$) диска определяется по формуле:

$$T = \frac{2\pi R}{V_{\text{р}}}, \qquad (4)$$

где $V_{\text{р}}$ – рабочая скорость агрегата;
$R$ – радиус игольчатого диска.

Частота колебаний ($K$) упругого элемента, обеспечивающаяся воздействием игольчатого диска, определяется по выражению:

$$K = \frac{NV_{\text{р}}}{2\pi R}, \qquad (5)$$

где $N$ – число игл диска.

Энергия удара ($E_{\text{у}}$) будет равна:

$$E_{\text{у}} = E_{\text{П}} + E_{\text{Ш}} = \frac{k(\Delta x)^2}{2} + m_1 g \Delta x, \qquad (6)$$

где $E_{\text{П}}$ – потенциальная энергия упругого элемента;
$E_{\text{Ш}}$ – потенциальная энергия груза;
$\Delta x$– величина смещения упругого элемента приводным игольчатым диском;
$k$ – приведенная жесткость упругого элемента;
$m_1$ – масса груза.

Энергия удара, передаваемая лапе за один оборот приводного игольчатого диска:

$$E = N \cdot \left[ \frac{k(\Delta x)^2}{2} + m_1 g \Delta x \right], \qquad (7)$$

где $N$ – число игл приводного игольчатого диска.

Полученное выражение (7) позволяет определять величину энергии ударных импульсов, сообщаемых культиваторной лапе приводным игольчатым диском комбинированного виброударного рабочего органа культиватора в зависимости от его конструктивных параметров (числа игл приводного диска, жесткости упругого элемента и массы груза).

**Выводы.**

1. Разработанная конструкция комбинированного виброударного рабочего органа культиватора позволяет обрабатывать почву с возможностью регулирования степени крошения почвы путем изменения амплитуды и частоты колебаний стойки культиваторной лапы в зависимости от почвенных условий (плотности, твердости, влажности), обеспечивая при этом снижение тягового сопротивления почвообрабатывающего орудия.

2. Полученные теоретические зависимости позволяют определить необходимую частоту колебаний упругого элемента, а также энергию удара, передаваемую культиваторной лапе за один оборот приводного игольчатого диска.

ЛИТЕРАТУРА

1. Верняев О. В. Активные рабочие органы культиваторов / Олег Васильевич Верняев. – М. : Машиностроение, 1983. – 79 с.
2. Дубровский А. А. Вибрационная техника в сельском хозяйстве / Алексей Алексеевич Дубровский. – М. : Машиностроение, 1968. – 204 с.

УДК 621.791:621.9

**Москалевич В. Ю.**

# ИССЛЕДОВАНИЕ ИЗНОСОСТОЙКОСТИ РЕЖУЩИХ ЭЛЕМЕНТОВ ПОЧВООБРАБАТЫВАЮЩИХ РАБОЧИХ ОРГАНОВ

*Наведено методику і результати дослідження зносостійкості ріжучих елементів ґрунтообробних робочих органів, зміцнених різними способами. Експериментально підтверджено ефективність зміцнення ґрунторіжучих деталей композиційними матеріалами.*

***Ключові слова:*** *культиваторна лапа, зносостійкість, ґрунт, ріжучий елемент, зміцнення, композиційне покриття.*

*Приведена методика и результаты исследования износостойкости режущих элементов почвообрабатывающих рабочих органов, упрочненных различными способами. Экспериментально подтверждена эффективность упрочнения почворежущих деталей композиционными материалами.*

***Ключевые слова:*** *культиваторная лапа, износостойкость, почва, режущий элемент, упрочнение, композиционное покрытие.*

*A method and results of research of wearproofness of cutting elements of the tillage working organs consolidated by different ways is resulted. Efficiency of consolidating of soil-cutting details by compositions materials is experimentally confirmed.*

***Key words:*** *claw, wearproofness, soil, cutting element, consolidating, composition coverage.*

**Постановка проблемы.** Обработка почвы при производстве сельскохозяйственной продукции является трудоемкой и энергоемкой операцией. Ее качество зависит от параметров и технического состояния рабочих органов почвообрабатывающих машин, которые эксплуатируются в почвенной абразивной среде. Вследствие изнашивания данные машины изменяют свои форму и размеры, что отрицательно влияет на агротехнические и энергетические показатели обработки почвы.

**Анализ публикаций.** Несмотря на проведенные ранее исследовательские работы, проблема повышения эффективности и долговечности рабочих органов почвообрабатывающих машин до настоящего времени остается достаточно острой. Низкий ресурс существующих рабочих органов негативно влияет на надежность орудий и приводит к необходимости выпуска большого количества запасных частей. Кроме того, многие серийные рабочие органы культиваторов имеют повышенные удельные нагрузочные показатели, особенно в изношенном состоянии, что приводит к увеличенному расходу топлива двигателями тракторов [1].

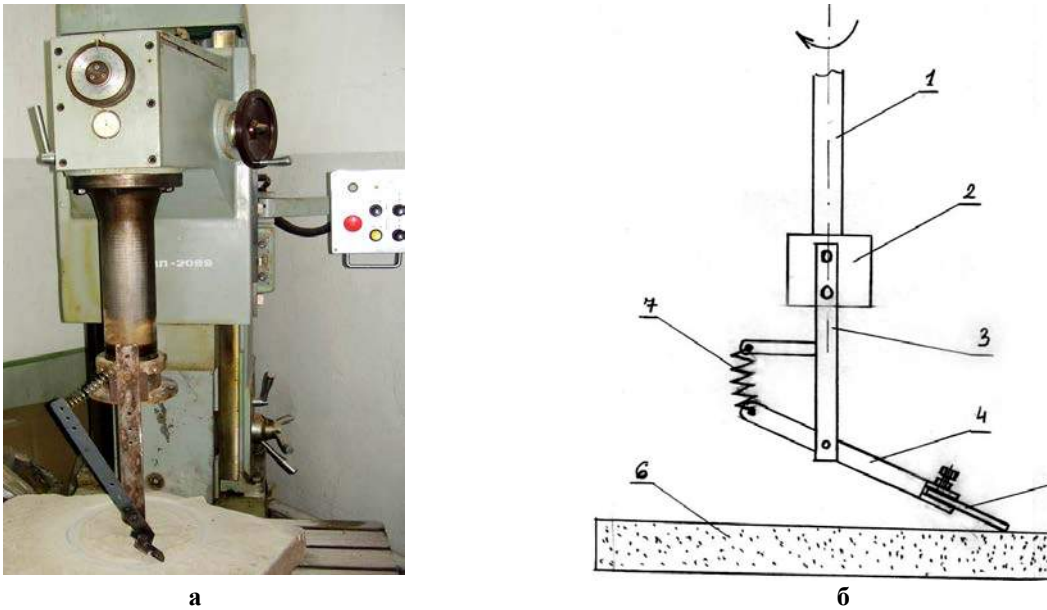
Рабочие органы почвообрабатывающих машин в основном подвержены абразивному износу в результате трения почвы по рабочим поверхностям. Учеными установлен характер абразивного износа и его закономерности. По данным этих авторов, процесс абразивного износа носит характер микрорезания твёрдыми абразивными частицами и усталостного разрушения микрообъёмов. Ими установлены закономерности износа от твердости материала рабочих органов и давления на их поверхности. Все известные способы сохранения работоспособности почворежущих деталей направлены на уменьшение скорости изнашивания путём применения более износостойких материалов или создания самозатачивающихся лезвий. На некоторых предприятиях сельскохозяйственного машиностроения с целью повышения износостойкости применяется наплавка изнашиваемых частей рабочих органов токами высокой частоты с применением твердых сплавов, таких как «сормайт», «релит», либо сварочными твердосплавными электродами марки Т-590. Однако эти способы позволяют повысить износостойкость почворежущих элементов не более чем в 1,5–2 раза, что является недостаточным [1, 2].

В настоящее время рассматривается возможность использования для упрочнения лезвий почвообрабатывающих рабочих органов композиционных материалов на основе карбидов хрома, ванадия, титана, вольфрама, молибдена и др., твердость которых превышает твердость абразивных частиц почвы, что даст возможность многократно повысить ресурс рабочих органов [3, 4].

**Цель статьи** – изложить результаты экспериментального сравнения износостойкости режущих элементов почвообрабатывающих рабочих органов, упрочненных различными способами.

**Изложение основного материала.**

***Методика исследования.*** В основу методики положена теория подобия и физического моделирования процесса изнашивания почворежущих элементов. Исследования проводились в лаборатории кафедры механизации, энергетики и технического сервиса ЮФ НУБиП Украины «КАТУ» с использованием лабораторной установки, представленной на рис. 1.




а б

**Рис. 1. Лабораторная установка для ускоренных исследований процесса изнашивания элементов почвообрабатывающих рабочих органов на твердой абразивной поверхности (а – общий вид, б – принципиальная схема).**

Установка работает следующим образом. При вращении шпинделя 1 и держательной головки 2 стойка 3 вращается вокруг оси шпинделя 1, рычаг прижима 4, вращаясь вместе со стойкой 3, прижимает носок испытуемого элемента 5 к твердой абразивной поверхности 6, в результате чего происходит износ носка испытуемого элемента 5. Постоянное и регулируемое по величине усилие прижима носка испытуемого элемента 5 к абразивной поверхности 6 обеспечивается с помощью пружины 7.

Подготовка элементов почвообрабатывающих рабочих органов производилась путем нарезки на полосы шириной 9–13 мм и длиной 40–60 мм рабочих органов (культиваторных лап) следующих вариантов: новых заводских, изношенных при работе в поле после оттяжки в кузнице, наплавленных сормайтом снизу, наплавленных сормайтом сверху, закаленных до максимальной твердости, закаленных до средней твердости, упрочненных композиционным материалом на основе карбида вольфрама. Твердость поверхности образцов определялась с помощью твердомера ТК-14-250 (ГОСТ 23678-79).

Исследуемые образцы 5 устанавливали в кронштейн 4 и пружиной 7 регулировали необходимое усилие прижима носка пластины 5 к твердой абразивной поверхности 6. Исследования износа проводились при рабочей линейной скорости движения изнашиваемого элемента относительно абразивной поверхности в пределах 2–4 м/с. Замеры износа производились путем взвешивания испытываемых пластин на лабораторных весах ВЛКТ-500 перед началом и через каждые 10 минут проведения опыта. Величина износа приводилась к ширине пластины.

***Результаты исследования.*** В табл. 1 приведены результаты сравнительных исследований износа образцов элементов почвообрабатывающих рабочих органов.

**Таблица 1.**

**Результаты сравнительных исследований износа образцов элементов почвообрабатывающих рабочих органов.**

| № образца | Материал элемента рабочего органа | Твердость поверхности образца $R_C$, HRC, HRA | Приведенный к ширине износ $\Delta m_a$, г/мм |
|---|---|---|---|
| 1 | Сталь 35 не термообработанная | 22 | 1,62 |
| 2 | Сталь 65Г термообработанная в условиях хозяйства | 43 | 0,75 |
| 3 | Сталь 65Г термообработанная в заводских условиях | 51 | 0,67 |
| 4 | Сталь 65Г с наплавкой твердым сплавом Т-620 | 58 | 0,57 |
| 5 | Инструментальная сталь | 62 | 0,50 |
| 6 | Сталь 65Г с наплавкой сормайтом | 64 | 0,48 |
| 7 | Сталь 65Г с покрытием композиционным материалом | 89 | 0,08 |

По данным табл. 1 построены диаграмма (рис. 2) и график зависимости интенсивности изнашивания элементов почвообрабатывающих рабочих органов от твердости их рабочей поверхности (рис. 3).

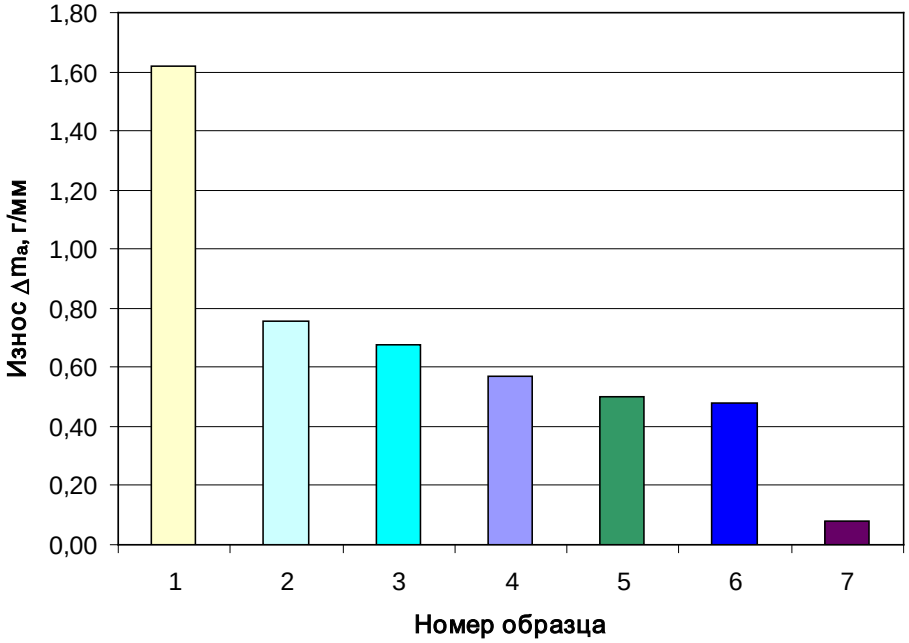



**Рис. 2. Износ элементов почвообрабатывающих рабочих органов по массе.**

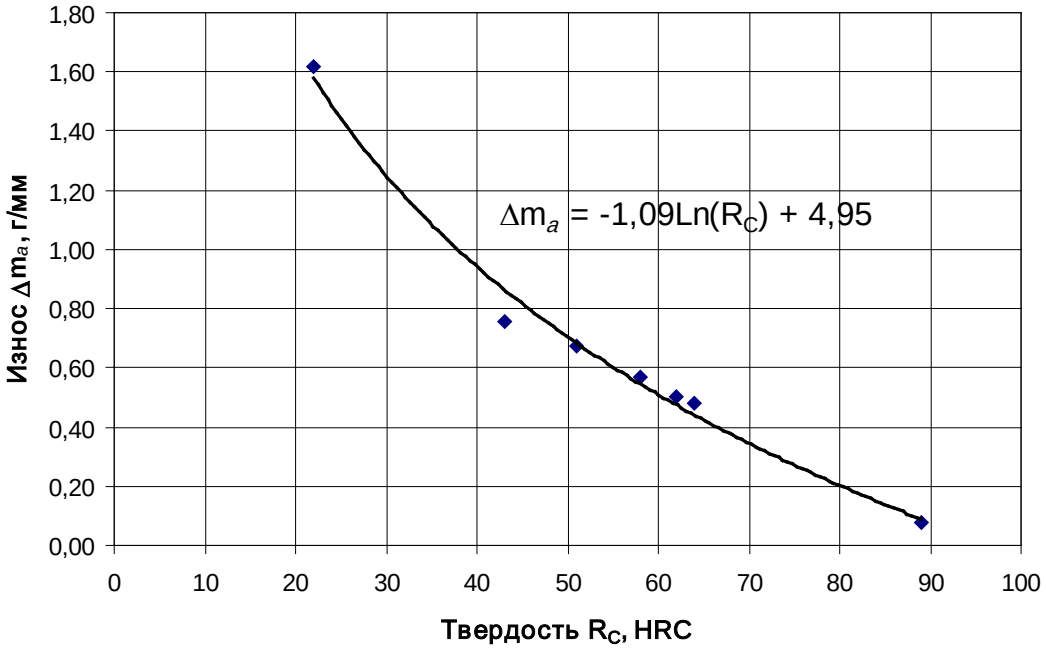



**Рис. 3. Зависимость интенсивности изнашивания почворежущих элементов от твердости их рабочей поверхности.**

Анализ полученной зависимости показывает, что с увеличением твердости рабочей поверхности почворежущих элементов интенсивность их изнашивания при взаимодействии с абразивом уменьшается по логарифмической зависимости. При этом износостойкость рабочей поверхности почворежущей детали, упрочненной композиционным материалом на основе карбида вольфрама, повышается в шесть раз по сравнению с деталью, наплавленной сормайтом, и в восемь раз – по сравнению с термически обработанным материалом культиваторных лап без наплавки. Таким образом, композиционные материалы можно рекомендовать для упрочнения режущих элементов почвообрабатывающих рабочих органов с целью повышения их износостойкости.

**Вывод.** С увеличением твердости рабочей поверхности почворежущих элементов интенсивность их изнашивания при взаимодействии с абразивом уменьшается по логарифмической зависимости. При этом наибольшую износостойкость обеспечивает покрытие композиционным материалом на основе карбида вольфрама, твердость которого превышает твердость абразивных частиц почвы, что дает возможность рекомендовать его для упрочнения режущих элементов почвообрабатывающих рабочих органов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Рабинович А. Ш. Самозатачивающиеся плужные лемехи и другие почворежущие детали машин / Ассир Шлемович Рабинович. – М. : Бюро технической информации ГОСНИТИ, 1962. – 107 с.
2. Синеоков Г. Н. Теория и расчёт почвообрабатывающих машин / Г. Н. Синеоков, И. М. Панов. – М. : Машиностроение, 1977. – 328 с.
3. Беловод А. И. Анализ исследований по повышению долговечности деталей сельскохозяйственных машин / А. И. Беловод // Збірник наукових праць Луганського Національного аграрного університету. Серія: Технічні науки. – Луганськ : Видавництво ЛНАУ, 2006. – № 68(91). – С. 13–16.
4. Аулін В. В. Керування характером та інтенсивністю зношування різальних частин робочих органів грунтообробних машин / В. В. Аулін, В. М. Бобрицький, Т. М. Ауліна, С. О. Маґопець, О. С. Маґопець // Вісник Харківського державного технічного університету сільського господарства. – Харків, 2004. – Випуск 23. – С. 270–273.