УЧЕНЫЕ ЗАПИСКИ КРЫМСКОГО ИНЖЕНЕРНО-ПЕДАГОГИЧЕСКОГО УНИВЕРСИТЕТА

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

Номер: **43** Год: **2014**

Тема выпуска: Технические науки

Название статьи	Страницы	Цит.
РАЗДЕЛ 1. АКТУАЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ РАЗВИТИЯ ТРАНСПОРТА		
ТЕРМОДИНАМИЧЕСКАЯ ВОЗМОЖНОСТЬ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ В ПОРШНЕВЫХ ДВИГАТЕЛЯХ ТЕПЛОТЫ ОТРАБОТАВШИХ ГАЗОВ ДЛЯ КАТАЛИТИЧЕСКОГО РИФОРМИНГА ЭМУЛЬГИРОВАННЫХ ВОДОЙ МОТОРНЫХ ТОПЛИВ *Подзноев Г.П., Абдулгазис У.А., Дроботюк Н.И.*	4-11	0
ТЕРМОДИНАМИКА КАТАЛИТИЧЕСКОГО РИФОРМИНГА ЭМУЛЬГИРОВАННОГО ВОДОЙ МОТОРНОГО ТОПЛИВА ДЛЯ ГАЗОТУРБИННОГО ДВИГАТЕЛЯ *Подзноев Г.П., Абдулгазис У.А., Курдюков А.О.*	11-18	0
ОПРЕДЕЛЕНИЕ ЗАВИСИМОСТИ КОЭФФИЦИЕНТА СЦЕПЛЕНИЯ ШИНЫ С ОПОРНОЙ ПОВЕРХНОСТЬЮ ОТ КИНЕМАТИЧЕСКОГО ПАРАМЕТРА КОЛЕСА *Подригало М.А., Абрамов Д.В.*	18-21	1
ОБЕСПЕЧЕНИЕ УПРАВЛЯЕМОСТИ И УСТОЙЧИВОСТИ МОБИЛЬНЫХ МАШИН ПРИ УСТАНОВИВШЕМСЯ ДВИЖЕНИИ *Подригало М.А., Артёмов Н.П., Клец Д.М., Гацько В.И.*	21-25	0
ПУТИ СОВЕРШЕНСТВОВАНИЯ ТЕХНОЛОГИИ ЛИТЬЯ ПОД ДАВЛЕНИЕМ ТЯЖЕЛЫХ КРУПНОГАБАРИТНЫХ ДЕТАЛЕЙ ИЗ АЛЮМИНИЕВЫХ СПЛАВОВ НА ПРИМЕРЕ БЛОКОВ ЦИЛИНДРОВ *Падерин В.Н., Абдулгазис У.А.*	25-32	0
ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ ПАССАЖИРСКОЙ ТРАНСПОРТНОЙ СИСТЕМЫ Г. СИМФЕРОПОЛЯ ПУТЕМ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ТРОЛЛЕЙБУСОВ С ЧАСТИЧНЫМ АВТОНОМНЫМ ХОДОМ *Сулейманов Э.С., Абдулгазис А.У., Сулейманов Э.Э.*	32-38	0
ВЛИЯНИЕ КАЧЕСТВА ОХЛАЖДАЮЩИХ ЖИДКОСТЕЙ НА РЕСУРС АВТОТРАКТОРНЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ *Эреджепов М.К., Абдулгазис А.У.*	38-44	1
РАЗДЕЛ 2. СОВРЕМЕННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ В МАШИНОСТРОЕНИИ		
ПРОЦЕСС СТРУЖКООБРАЗОВАНИЯ И КАЧЕСТВО ПОВЕРХНОСТИ ПРИ ЭЛЕКТРОФРИКЦИОННОЙ РАЗРЕЗКЕ ЗАГОТОВОК *Покинтелица Н.И.*	45-49	0
***Z*-ПРЕОБРАЗОВАНИЕ ДИСКРЕТНЫХ СИСТЕМ МОНИТОРИНГА И УПРАВЛЕНИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ ПРОЦЕССА ШЛИФОВАНИЯ** *Ягьяев Э.Э., Ярошенко А.А.*	50-53	0
РЕАКЦИЯ ДИНАМИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ НА ПРОИЗВОЛЬНЫЙ СИГНАЛ *Долгин В.П., Владецкая Е.А., Братан С.М.*	53-58	0
ПОВЫШЕНИЕ КАЧЕСТВА ОБРАБОТКИ ПРИ ШЛИФОВАНИИ В УСЛОВИЯХ МЕХАНООБРАБАТЫВАЮЩИХ УЧАСТКОВ ПЛАВУЧИХ РЕМОНТНЫХ МАСТЕРСКИХ *Братан С.М., Владецкая Е.А., Харченко А.О.*	58-66	0
ОСОБЕННОСТИ ИЗГОТОВЛЕНИЯ ЦЕЛЬНЫХ АВТОМОБИЛЬНЫХ ДИСКОВ ИЗ АЛЮМИНИЕВЫХ СПЛАВОВ ЛИТЬЕМ ПОД НИЗКИМ ДАВЛЕНИЕМ В ФОРМЫ С ГИПСОВЫМИ ВСТАВКАМИ *Падерин В.Н., Абдулгазис Д.У.*	66-71	0
ОСОБЕННОСТИ МОДЕЛИРОВАНИЯ ПОВЕДЕНИЯ ТЕХНИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ ПРОЦЕССА РЕЗАНИЯ ПРИ СВЕРЛЕНИИ *Умеров Э.Д., Ягьяев Э.Э.*	71-77	0
ОБЕСПЕЧЕНИЕ СТАБИЛЬНОСТИ ПАРАМЕТРОВ КАЧЕСТВА ПРИ ШЛИФОВАНИИ И ЗАТОЧКЕ ПРОТЯЖЕК *Богуцкий В.Б., Шрон Л.Б.*	77-82	0
РАЗДЕЛ 3. СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННОЕ МАШИНОСТРОЕНИЕ		
ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ ОБОСНОВАНИЕ ПАРАМЕТРОВ ПОДПРУЖИНЕННОЙ КУЛЬТИВАТОРНОЙ ЛАПЫ *Бабицкий Л.Ф., Куклин В.А.*	83-85	1
ОБОСНОВАНИЕ ОПТИМАЛЬНОЙ ФОРМЫ ИГЛ ПОЧВООБРАБАТЫВАЮЩИХ ИГОЛЬЧАТЫХ ДИСКОВ *Бабицкий Л.Ф., Соболевский И.В., Куклин В.А.*	85-88	0
ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ ОБОСНОВАНИЕ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ВОЗДУШНО-ЖИДКОСТНОГО ПОТОКА НА ОПРЫСКИВАТЕЛЕ ДЛЯ БОРЬБЫ С СОРНОЙ РАСТИТЕЛЬНОСТЬЮ НА МНОГОЛЕТНИХ НАСАЖДЕНИЯХ *Османов Э.Ш.*	89-93	0
РАЗДЕЛ 4. ПРОБЛЕМЫ ОХРАНЫ ТРУДА И ЗАЩИТЫ ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЫ		
ОЦЕНКА ВЛИЯНИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ПОЛЕЙ ВЫСОКОВОЛЬТНЫХ ЛИНИЙ ЭЛЕКТРОПЕРЕДАЧИ НА ОКРУЖАЮЩУЮ СРЕДУ *Кучеренко С.В., Асанов М.М., Бекиров Э.А.*	94-99	0
ЛЬГОТЫ И КОМПЕНСАЦИИ ЗА РАБОТУ ВО ВРЕДНЫХ ИЛИ ТЯЖЕЛЫХ УСЛОВИЯХ ТРУДА *Савчук С.И.*	99-105	0

Раздел 1. АКТУАЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ РАЗВИТИЯ ТРАНСПОРТА

УДК 629.113

Подзноев Г. П., Абдулгазис У. А., Дроботюк Н. И.

ТЕРМОДИНАМИЧЕСКАЯ ВОЗМОЖНОСТЬ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ В ПОРШНЕВЫХ ДВИГАТЕЛЯХ ТЕПЛОТЫ ОТРАБОТАВШИХ ГАЗОВ ДЛЯ КАТАЛИТИЧЕСКОГО РИФОРМИНГА ЭМУЛЬГИРОВАННЫХ ВОДОЙ МОТОРНЫХ ТОПЛИВ

Аннотация. *Проведены термодинамические исследования возможности использования теплоты отработавших газов в поршневых двигателях внутреннего сгорания для предварительного каталитического риформинга эмульгированного водой дизельного топлива в теплообменном реакторе. Расчетным путем установлены основные характеристики химической трансформации смеси дизельного топлива и воды при термическом воздействии на него тепловой энергии. Полученные результаты свидетельствуют о термодинамической возможности значительного повышения энергопотенциала продуктов риформинга, позволяющего существенно снизить расход углеводородной составляющей автомобильного топлива.*

Ключевые слова: *термодинамика, поршневые двигатели, теплота отработавших газов, водоэмульгированное дизельное топливо, каталитический риформинг.*

Подзноєв Г. П., Абдулгазіс У. А. Дроботюк М. І.

ТЕРМОДИНАМІЧНА МОЖЛИВІСТЬ ВИКОРИСТАННЯ В ПОРШНЕВИХ ДВИГУНАХ ТЕПЛОТИ ВІДПРАЦЬОВАНИХ ГАЗІВ ДЛЯ КАТАЛІТИЧНОГО РИФОРМІНГУ ЕМУЛЬГОВАНИХ ВОДОЮ МОТОРНИХ ПАЛИВ

Анотація. *Проведено термодинамічні дослідження можливості використання теплоти відпрацьованих газів поршневого двигуна для попереднього каталітичного риформінгу емульгованому водою дизельного палива в теплообмінному реакторі. Розрахунковим шляхом встановлено основні характеристики хімічної трансформації суміші дизельного палива й води при термічному впливі на нього теплової енергії. Отримані результати свідчать про термодинамічні можливості значного підвищення енергопотенціалу продуктів риформінгу, що дозволяє істотно знизити витрату вуглеводневої складової автомобільного палива.*

Ключові слова: *термодинаміка, поршневі двигуни, теплота відпрацьованих газів, емульговане водою дизельне паливо, каталітичний риформінг.*

Podznoev G. P., Abdulgazis U. A., Drobotyuk N. I.

THERMODYNAMIC POSSIBILITY OF USING THE HEAT OF EXHAUST GASES IN PISTON ENGINES FOR THE CATALYTIC REFORMING OF EMULSIFIED WATER MOTOR FUELS

Summary. *A thermodynamic study of the possibility of using heat from exhaust gases of a piston engine for catalytic reforming of the diesel fuel emulsified with water in a heat exchange reactor is held. Calculation showed the main characteristics of chemical transformation of the mixture of diesel fuel and water if exposed to thermal heat. The results suggest the thermodynamic possibility of a significant increase in energy potential of reformate, which can significantly reduce the consumption of hydrocarbon component of motor fuel.*

Thus the authors proposed a schematic diagram of a reciprocating engine with heat exchanger catalytic reactor in which, apart from the exhaust heat recovery, thermochemical reforming water-fuel emulsions occur extracting hydrogen to the free phase, thereby increasing the power consumption of reformate.

Key words: *thermodynamics, piston engine, exhaust gases heat, diesel fuel emulsified with water, catalytic reforming.*

Постановка проблемы. Энергия – основной ресурс, обеспечивающий существование современной цивилизации, и глобальный спрос на нее стремительно возрастает (около 3% в год) вследствие увеличения численности мирового населения, улучшения качества жизни, развития мировой промышленности, индустриализации развивающихся стран, научно-технического прогресса. При сохранении таких темпов к середине XXI века мировой энергобаланс может возрасти в 2,5 раза, а к концу века – в 4 раза [1].

Исторически сложилось, что базовой основой энергообеспечения является природное органическое сырье – уголь, нефть и природный

газ. В начале XXI века в мире потреблялось 3,4 млрд. т угля, 3,5 млрд. т нефти и 2,4 трлн. $м^3$ газа, что энергетически эквивалентно 420×10^{12} МДж с удельным годовым потреблением на одного обитателя Земли 18,6 МВт. Из последних лишь 2,1 МВт – полезно потребляемая энергия, а 16,5 МВт – рассеиваемая в окружаемом пространстве в виде тепловых потерь, существенно превосходящих в отдельных местах равновесный фон.

Существенную долю в этот баланс вносит и транспортный сектор с поршневыми двигателями внутреннего сгорания. Вводимая в термодинамическую систему поршневых двигателей теплота расходуется на совершение полезной работы и на изменение внутренней энергии системы. По данным исследований внешнего теплового баланса поршневого двигателя, существенная часть энергии топлива, вводимого в цилиндр, не реализуется в виде работы, а выводится из цикла, обуславливая тем самым соответствующие необратимые потери цикла. Это означает, что в любом случае часть теплоты в системе остается неиспользованной.

В приложении к циклам тепловых двигателей эта неиспользованная теплота выводится в виде горячих отработавших газов и путем теплопередачи через стенки рабочего цилиндра в систему охлаждения двигателя. В дизелях доля потерь энергии топлива, уносимой с отработавшими газами, достигает 40%, что соответствует примерно 17000 кДж (4,7 кВт) на каждый килограмм израсходованного топлива. При ориентировочном количестве автотранспортных средств в пределах одного миллиарда единиц, их годовой выброс CO_2 и CO составляет, соответственно, 4,5 и 0,4 млрд. т или около 15% от общих выбросов CO_2 и до 50% CO. В мегаполисах на долю автотранспорта эти соотношения могут достигать 60% по CO_2 и 90–95% по CO от общего загрязнения атмосферы города, что может привести к превышению ПДК в десятки раз. Сюда следует добавить окислы азота и выбросы химдобавок в топливо [2].

Из сказанного следует, что генеральным направлением дальнейшего развития автотранспортного сектора на данном этапе должна стать как диверсификация энергообеспечения поршневых двигателей, так и повышение полноты использования энергопотенциала традиционного моторного топлива.

Анализ литературы. Одним из направлений снижения указанных выше негативных последствий является повышение коэффициента полезного использования теплоты сгорания моторных топлив в существующих конструкциях поршневых двигателей.

Традиционные способы регенерации теплоты, направленные на снижение тепловых потерь с отработавшими газами, используются в крупных судовых и стационарных силовых установках, в частности на основе применения котлов-утилизаторов для получения пара или горячей воды.

На двигателях меньшей размерности, например, автотракторного типа, реализация подобных способов утилизации тепловой энергии отработавших газов практически неосуществима. В двигателях данного типа тепловая энергия газового потока на выходе частично может быть преобразована в работу в сопряженных паровых и газовых турбинах.

В последнее время получают также развитие исследования по разработке утилизационных контуров для силовых установок, работающих по циклу Ренкина.

Также теплота отработанных газов частично используется в дизельных двигателях с турбонаддувом, когда выходящие из цилиндра под избыточным давлением газы вращают крыльчатку турбины и передают энергию совмещенного с ней воздушного компрессора. При этом тепловая энергия трансформируется в механическую и возвращается в виде дополнительного давления на стадии адиабатного сжатия и горения топлива. На это используется около 25% энергии выхлопных газов. Турбонаддув позволяет не только повысить удельную мощность и крутящий момент на 15–20%, но и добиться улучшения топливной экономичности двигателя вследствие более полного сгорания топлива.

Еще одним из путей повышения степени рационального использования теряемой части термодинамической теплоты в двигателе дополнительно к процессу наддува может быть система ее регенерации с подачей непосредственно на стадию горения топлива. Наиболее подходящим для этого теплоносителем может быть обычная вода, характеризующаяся наиболее высокой теплоемкостью в жидкой фазе.

Проведено значительное количество экспериментальных работ [3], показавших, что жидкие эмульгированные водой топлива сгорают быстрее, чем безводные. Вода не ухудшает, а улучшает процессы горения по причине дополнительного дробления капель топлива, увеличения поверхности горения частиц и хорошего перемешивания горючего с воздухом. Сокращение времени сгорания капель благоприятно сказывается на догорании сажистых остатков, так как улучшает полноту сгорания топлива и уменьшает отложение сажи (нагара) на рабочих поверхностях.

Присутствие паров воды значительно снижает температуру газовой фазы при одновременном

возрастании давления, а также препятствует образованию окислов азота. Процессы смесеобразования, воспламенения и горения для обводненного эмульгированного топлива протекают более интенсивно, чем для топлива безводного, и потому они обеспечивают в конечном итоге повышенные показатели сгорания как во времени, так и по полноте.

Более перспективно направление утилизации тепловой энергии отработавших газов (ОГ) на основе использования предварительного термохимического преобразования исходного жидкого топлива в синтез-газ. Сущность подобного способа трансформации заключается в том, что под воздействием тепловой энергии отработавших газов происходит деструкция углеводородных цепочек топлива с образованием более коротких углеводородов и водородной фазы. Тем самым снижается доля внутренней энергии топлива, расходуемая на этот процесс перед его сгоранием в рабочем цилиндре двигателя, облегчаются процессы газосмешения и сгорания, возрастает количество теплоты на совершение полезной работы, уменьшается недогар, снижаются тепловые потери и токсичные выбросы в окружающую среду.

В промышленной практике широко используются процессы каталитического преобразования природных углеводородов нефти и газа для получения широкого спектра продуктов, в том числе и моторных топлив с более приемлемыми энергетическими возможностями.

При температурах выше 1000°С углеводороды полностью распадаются на водород и углерод.

При 700–800°С из жидких углеводородов образуются главным образом более легкие газообразные углеводороды и кокс.

При температурах от 440 до 540°С процесс термодеструкции (крекинг-процесс) ограничивается только простым структурным расщеплением первичных углеводородов на более короткие и легкие фазы, отличающиеся от первоначальных по температурам кипения, удельному весу и другим показателям. Таким образом получают бензин и дизельное топливо с их массовым выходом в пределах 25–50% от исходного сырья.

Ниже 360°С углеводороды расщепляются только в присутствии катализаторов. При этом значительно возрастает как скорость, так и полнота превращения исходных углеводородов. С большей эффективностью катализаторы действуют на более тяжелые углеводороды. Так, скорость разложения цетана ($C_{16}H_{34}$, температура кипения 287°С) почти в 13 раз выше скорости крекинга гептана (C_7H_{16}, температура кипения 98°С).

Крекинг сырья протекает с поглощением тепла, которое называется теплотой реакции крекинга. Эта теплота затрачивается на разрыв связей между атомами молекулы. При обычной глубине разложения сырья теплота реакции каталитического крекинга приблизительно равна 50 большим калориям на один килограмм пропускаемого через реактор сырья. Основным недостатком традиционного крекинга и термовоздушной конверсии в продуктах реакции наряду с H_2 и СО содержится довольно много твердофазного сажистого углерода, который пассивирует активную поверхность катализатора, снижая тем самым эффективность основного процесса.

Среди разнообразных конструкций устройств для газификации моторных топлив в высокооктановый газ следует отметить газификатор фирмы «51етепз», который испытан в стендовых условиях на двигателях. Из низкооктанового прямогонного бензина данный газификатор обеспечивал получение синтез-газа с октановым числом около 108 следующего состава: 4–6% (об.) H_2, 8–19% (об.) CH_4, 8–9% (об.) СО, 3,5–6% (об.) CO_2 и 50–55% (об.) N_2 с КПД газификатора около 95%. Газификация топлива обеспечивала расширение предела обеднения топливной смеси до α = 1,45–1,6, что в совокупности с другими факторами позволило повысить энергетический КПД двигателей на 10–15% и снизить выбросы оксидов углерода и азота в 3–6 и 1,2–1,5 раза, соответственно [4].

Более перспективен в этом отношении вариант использования в процессе каталитического крекинга обычной воды.

В качестве сырья процесса термокаталитической конверсии наибольшее применение получил метанол, что связано с высоким содержанием водорода в этом продукте (свыше 12%), низкой температурой процесса (200–300°С), его высокой энергетической эффективностью и простотой организации. Согласно термодинамическим расчетам, в продуктах конверсии водных растворов метанола может содержаться до 70% H_2. При использовании тепла отработавших газов на каждый моль превращенного метанола утилизируется 75 кДж тепла, благодаря чему теоретический КПД системы газификатор – поршневой двигатель, повышается примерно на 11%.

Паровая конверсия углеводородного моторного топлива в конструктивном отношении более сложная. Это обусловлено необходимостью иметь дополнительную емкость для воды, систему ее подачи и дозирования (рис. 1). Установка включает сырьевой узел, аппарат для конверсии бензина (совмещающий функции реактора), дополнительный реактор для паровой конверсии оксида углерода и аппарат для сероочистки [5].

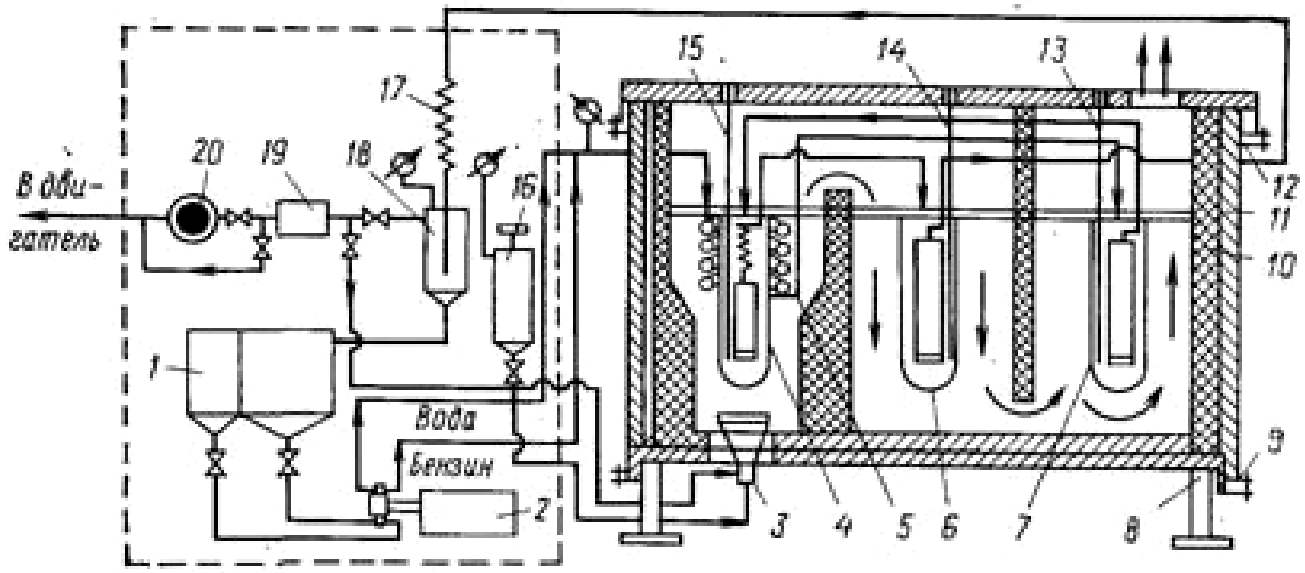


Рис. 1. Схема установки паровой конверсии бензина УКБ-1:
1 – бачки бензина и воды; 2 – насос-дозатор; 3 – топочное устройство;
4 – реактор конверсии бензина;5 – змеевик; 6 – реактор паровой конверсии СО;
7 – устройство сероочистки; 8 – стойки; 9, 12 – фиксаторы;
10 – тепловая изоляция; 11– корпус; 13–15 – термопары; 16 – ресивер природного газа;
17 – холодильник-конденсатор; 18 – влагоотделитель; 19 – ротаметр; 20 – регулятор давления.

Производительность данной установки по выходу водорода 35–70% (об.), массовое отношение вода : бензин = 3,4–5,0, температура 300–750°С; масса установки без сырья и катализатора – 75 кг. Выход водорода и производительность процесса растут с повышением температуры и избытка водяного пара. Повышение же давления резко снижает выход водорода в диапазоне 0,5–1,5 МПа от 56,8 до 42,1% (об.).

Таким образом, в существующей научной литературе обосновывается возможность предварительной термической трансформации традиционного моторного топлива на борту автомобиля. При этом источником требуемой теплоты для этого процесса могут служить отработавшие газы.

Цель статьи – путем термодинамического моделирования предварительного термохимического риформинга эмульгированного водой традиционного моторного топлива (бензин и дизель) с использованием теплоты отработавших газов определить основные технологические и параметрические характеристики процесса сгорания продуктов риформинга в типовых рабочих циклах поршневых двигателей.

Изложение основного материала. Одним из путей повышения степени рационального использования теряемой части термодинамической теплоты в двигателе может быть система ее регенерации с топливом. В этом случае не только регенерируется теплота отработавших газов, но и не тратится тепловая энергия сгорания топлива на его предварительный нагрев до кипения и испарение перед сгоранием уже в камере сгорания. Таким образом, улучшается кинетика сгорания топлива и повышается общий КПД цикла Дизеля.

Наиболее подходящим для этого теплоносителем могут быть отработавшие газы, имеющие достаточный тепловой потенциал. В этом случае одним из концептуальных решений является предварительная подача водоэмульгированного топлива топливным насосом высокого давления через каталитический теплообменник, обогреваемый отработавшими газами [6].

За базовую основу приняты варианты идеализированных термодинамических циклов поршневых двигателей с квотированной подачей топлива на один рабочий цикл в условиях стехиометрических соотношений участвующих композиционных составляющих в условной последовательности операций по схеме, изображенной на рис. 2.

Дополнительно перед теплообменником топливо эмульгируется конденсатом паров воды, находящихся в отработавших газах. Присутствие паров воды значительно снижает температуру газовой фазы при одновременном возрастании полезного давления, а также препятствует образованию окислов азота и сажистого углерода.

Результаты многих исследований показали, что процессы смесеобразования, воспламенения и горения для обводненного эмульгированного топлива протекают более интенсивно, обеспечивая в конечном итоге более высокие показатели сгорания как по времени, так и по полноте.

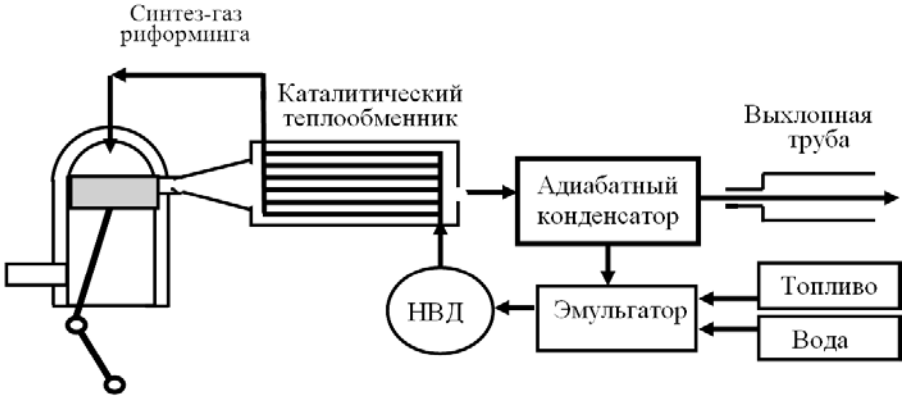


Рис. 2. Принципиальная схема теплообменного каталитического реактора.

Для снятия проблемы расслоения водоэмульгированного топлива при его хранении или длительной стоянке автомобиля предусмотрено раздельное содержание воды и топлива на борту автомобиля и их совместная дозированная подача через систему эмульгирования и риформинга. Подобный вариант дает возможность подавать в систему воду, предварительно нагретую за счет теплоты отходящих газов, что позволяет осуществить более полную регенерацию теплоты отработавших газов с возвратом ее в основной процесс, поэтому оно готовится при рабочем режиме двигателя.

На выходе из рабочего цилиндра отработавшие газы по газоходу проходят через трубчатый каталитический теплообменник и передают теплоту встречному потоку предварительно эмульгированного водой исходного моторного топлива. После теплообменника парогазовая топливная смесь поступает в рабочий цилиндр двигателя.

Отработавшие газы после теплообменника поступают в адиабатный конденсатор, где пары воды конденсируются до жидкой фазы. Далее конденсат направляется в эмульгатор для смешения конденсата с топливом, и насосом высокого давления смесь подается в каталитический теплообменник. Таким образом, регенерируется также и часть теплоты отработавшей парогазовой фазы, передаваемой конденсату.

Риформинг исходных продуктов протекает с поглощением тепла отработавших газов, которое затрачивается на разрыв связей между атомами углеводородной молекулы. Кроме этого, часть теплоты расходуется также на испарение сырья и нагрев его до рабочей температуры каталитического риформинга.

В идеальном варианте парового риформинга исходного топлива образуется так называемый синтез-газ. В зависимости от условий проведения риформинга процесс может осуществляться по двум основным направлениям:

1) неполный риформинг:

$C_{15}H_{32} + 15H_2O + Q\text{-катализ} = 15CO + 31H_2$.

2) полный риформинг:

$C_{15}H_{32} + 30H_2O + Q\text{-катализ} = 15CO_2 + 62H_2$.

Получаемый синтез-газ состоит практически из водорода и монооксида (диоксида) углерода с более высокой теплотой сгорания в сравнении с исходными углеводородами, повышенным октановым и цетановым числом и чистым выхлопом при его сгорании. По атомному балансу химических компонентов из вышеприведенных стехиометрических формул следует, что в сравнении с исходным топливом в продуктах риформинга существенно возрастает количество свободного водорода: почти в два раза при неполном варианте и почти в 3,9 раза при полном риформинге. Причем во втором варианте идеализированного процесса теплоносителем становится практически только энергетически и экологически более эффективный водород. Кроме того, получаемый таким образом синтез-газ выходит из каталитического реактора и поступает в рабочий цилиндр поршневого двигателя с температурой отработавших газов, входящих в теплообменник. То есть часть теплоты возвращается обратно к началу процесса.

В качестве исходных данных сравнительного термодинамического анализа принята квота единичного заряда дизельного топлива (на примере гептана $C_{15}H_{32}$) в 0,2; 0,15 и 0,1 г на один рабочий цикл с объемом рабочей камеры 3,0 дм^3 (табл. 1–5).

Таблица 1.

Расчет материального баланса процесса горения топлива в традиционном идеальном цикле Дизеля.

	$C_{15}H_{32}$	$23O_2$ всего	N_2	Сумма	$15CO_2$	$16H_2O$	N_2	O_2 избыток	Сумма
Мольная масса, г	212	736		948	660	288			948
Масса, г	0,2	0,82472	2,7139	3,5386	0,6226	0,2717	2,7139	0,1304	3,7386
Тепловой эффект сгорания единичного заряда 0,2 г дизельного топлива +8882,07 Дж									

Таблица 2.

Стехиометрический расчет неполного каталитического риформинга $C_{15}H_{32} + 15H_2O = 15CO + 31H_2$.

	$C_{15}H_{32}$	$15H_2O_ж$	Сумма	15CO	$31H_2$	Сумма
Мольная масса, г	212	270	482	420	62	482
Масса, г	0,2	0,25472	0,45472	0,39623	0,05849	0,45472
	0,15	0,19104	0,34104	0,29717	0,04387	0,34104
	0,1	0,12736	0,22736	0,19811	0,02925	0, 22736
Тепловой эффект риформинга 0,2 г – 2814,0 Дж 0,15 г – 2110,32 Дж 0,1 г – 1406,98 Дж						

Таблица 3.

Стехиометрический расчет полного каталитического риформинга $C_{15}H_{32} + 30H_2O = 15CO_2 + 46H_2$.

	$C_{15}H_{32}$	$30H_2O_ж$	Сумма	$15CO_2$	$46H_2$	Сумма
Мольная масса, г	212	540	752	660	92	752
Масса, г	0,2	0,5094	0,7094	0,6226	0,0868	0,7094
	0,15	0,3821	0,5321	0,4670	0,0651	0,5321
	0,1	0,2547	0,3547	0,3113	0,0434	0,3547
Тепловой эффект риформинга 0,2 г – 2853,87 Дж 0,15 г –2140,25 Дж 0,1 г –1426,93 Дж						

Таблица 4.

Стехиометрический расчет материального баланса сгорания продуктов неполного риформинга моторного топлива.

		15CO	$31H_2$	$23O_2$	N_2	Σ	$15CO_2$	$31H_2O_г$	N_2	Σ
Мольная масса, г		420	62	736		1218	660	558		1218
Масса, г	0,2	0,39623	0,05849	0,69435	2,25595	3,40502	0,62265	0,52642	2,25595	3,40502
	0,15	0,29717	0,04387	0,52076	1,69195	2,55375	0,46698	0,39481	1,69195	2,55374
	0,1	0,19811	0,02925	0,34716	1,12793	1,70245	0,31132	0,26320	1,12793	1,70245
Тепловой эффект сгорания синтез-газа			+11078,27 Дж/0,2 г $C_{15}H_{32}$ +8311,02 Дж/0,15 г $C_{15}H_{32}$ +5533,09 Дж/0,1 г $C_{15}H_{32}$			Теплосодержание отработавших газов		+5966,0 Дж/0,2 г $C_{15}H_{32}$ +4154,0 Дж/0,15 г $C_{15}H_{32}$ +2510,8 Дж/0,1 г $C_{15}H_{32}$		

Таблица 5.

Стехиометрический расчет материального баланса сгорания продуктов полного риформинга моторного топлива.

		$15CO_2$	$46H_2$	$23O_2$	N_2	Σ	$46H_2O$	N_2	$15CO_2$	Σ
Мольная масса, г		660	92	736		1488	828		660	1488
Масса, г	0,2	0,62264	0,08679	0,69434	2,25593	3,65970	0,78113	2,25593	0,62264	3,65970
	0,15	0,46698	0,06509	0,52075	1,69193	2,74475	0,58585	1,69193	0,46698	2,74476
	0,1	0,31132	0,04340	0,34717	1,12796	1,82985	0,39057	1,12796	0,31132	1,82985
Тепловой эффект сгорания синтез-газа			+10494,7 Дж/0,2 г $C_{15}H_{32}$ +7871,9 Дж/0,15 г $C_{15}H_{32}$ +5247,9 Дж/0,1 г $C_{15}H_{32}$			Теплосодержание отработавших газов		+5673,4 Дж/0,2 г $C_{15}H_{32}$ +3951,3 Дж/0,15 г $C_{15}H_{32}$ +2423,5 Дж/0,1 г $C_{15}H_{32}$		

Из приведенных в табл. 1–5 результатов термодинамических расчетов можно сделать определенные заключения.

1. Теплосодержания отработавших газов в идеализированном цикле более чем достаточно для термокаталитического риформинга эмульгированного дизельного топлива и его превращения в синтез-газ.

2. Получаемый в результате термокаталитического риформинга синтез-газ выходит из риформера и подается в рабочую камеру двигателя с температурой отработавших газов и давлением, создаваемым насосом высокого давления при подаче эмульгированного водой топлива перед теплообменным риформером.

3. Подача нагретого синтез-газа в рабочий цилиндр двигателя значительно улучшает кинетику его сгорания в сравнении с жидким первичным дизтопливом, на испарение которого и предварительный разрыв химических связей углеводородных структур затрачивается время и часть располагаемой теплоты, исключаемой из последующего выполнения работы адиабатного расширения.

4. В варианте полного каталитического риформинга эмульгированного водой традицион-

ного моторного топлива генерируется синтез-газ, содержащий в качестве энергоносителя только молекулярный водород, высвобождающийся как из углеводородной части, так и из стехиометрической доли воды, что дополнительно повышает энергопотенциал синтез-газа.

Тем самым, соответственно, повышается и количество вводимой в процесс потенциальной энергии как за счет опосредованного реверса теплоты отработавших газов, так и за счет высвобождения водорода воды в самостоятельную фазу.

Итоговые сравнительные данные термодинамического моделирования процесса термокаталитического риформинга эмульгированного водой дизельного топлива с использование теплоты отработавших газов отражены в табл. 6.

Таблица 6.

Технологические и параметрические характеристики идеализированного цикла Дизеля с каталитическим риформингом эмульгированного водой дизельного топлива.

Параметры цикла*	**Традиционный цикл (0,2 г $C_{15}H_{32}$)**	**Неполный каталитический риформинг ($C_{15}H_{32}$)**			**Полный каталитический риформинг ($C_{15}H_{32}$)**		
		0,2 г	**0,15 г**	**0,1 г**	**0,2 г**	**0,15 г**	**0,1 г**
$Q_{риф}$, Дж	–	–2814,96	**–2110,32**	–1406,98	–2853,87	**–2140,25**	–1426,93
$Q_{сгор}$, Дж	+7843,36	+11078,27	**+8311,02**	+5533,09	+10494,7	**+7871,9**	+5247,9
$Q_{син\text{-}газ}$, Дж	–	516,2	**384,2**	255,8	758,4	**536,9**	383,2
Q_1, Дж	+7843,36	11594,47	**8695,22**	5788,89	11253,1	**8408,8**	5631,1
$P_{2,3}$, × 10^5 Па	48,8	48,8	**48,8**	48,8	48,8	**48,8**	48,8
T_2, К	855,2	855,2	**855,2**	855,2	855,2	**855,2**	855,2
T_3, К	2466	2891,5	**2527,2**	2082,6	2659,6	**2355,7**	1985
P_4, × 10^5 Па	4,7	6,0	**4,8**	3,6	5,3	**4,4**	3,4
T_4, К	1400,1	1783	**1444,9**	1071,1	1593,5	**1314,8**	1005,5
Q_2, Дж	3747,2	5966,0	**4154,0**	2510,8	5673,4	**3951,3**	2423,5
Q_3, Дж	3747,2	3151,04	**2043,68**	1103,82	2819,87	**1811,05**	996,57
η_t	0,522	0,485	**0,522**	0,566	0,496	**0,53**	0,57
η_q	0,522	0,728	**0,765**	0,809	0,749	**0,785**	0,823
A, Дж	4094,2	5623,3	**4538,9**	3276,5	5581,5	**4456,7**	3209

*Примечания: $Q_{риф}$ – теплота, расходуемая на термориформинг эмульгированного водой моторного топлива;
$Q_{сгор}$ –теплота сгорания топлива;
$Q_{син\text{-}газ}$ – теплосодержание синтез-газа после риформера;
Q_1 – общая располагаемая теплота сгорания синтез-газа в рабочем цилиндре;
$P_{2,3}$ – давление после адиабатного сжатия и изобарного сгорания;
T_2 – температура воздуха после адиабатного сжатия;
T_3 – температура изобарного сгорания топлива;
P_4 – давление в рабочем цилиндре в конце адиабатного расширения;
T_4 – температура газов в конце адиабатного расширения;
Q_2 – теплосодержание отработавших газов в конце адиабатного расширения;
Q_3 – теплосодержание отработавших газов после теплообменного риформера;
η_t – термический КПД идеализированного термодинамического цикла;
η_q – коэффициент полезного использования располагаемой теплоты;
A – полезная работа идеализированного термодинамического цикла.

Данные табл. 6 позволяют выделить следующие особенности.

1. Для всех рассмотренных вариантов неизменным принимался процесс адиабатного сжатия воздуха в рабочем цилиндре, принятом при обычном для дизельного двигателя коэффициенте сжатия 15–22.

2. Теплосодержание синтез-газа ($Q_{син\text{-}газ}$) после риформинга принималось при температуре отработавших газов с учетом индивидуальных теплоемкостей его компонентов.

3. Общая теплота (Q_1), вводимая в процесс, определялась как сумма низшей теплоты сгорания синтез-газа ($Q_{сгор}$) при стандартных условиях и его теплосодержания после риформера ($Q_{син\text{-}газ}$).

4. При равенстве единичного массового заряда в идеализированном цикле существенно возрастают количество располагаемой теплоты, температура изобарного сгорания, температура и теплосодержание отработавших газов и полезная работа при относительно сниженном термическом КПД. Шаговое снижение относительно традиционного Дизеля величины заряда для вариантов неполного и полного риформинга исходного топлива приводит, с одной стороны, к поступательному снижению основных параметрических и технологических характеристик, с другой – к возрастанию термического КПД. Причем эти снижения имеют большую величину для полного риформинга.

В вариантах идеализированных циклов Дизеля, условно приближенных по количеству получаемой работы, последние характеризуются следующими особенностями (см. табл. 7):

- экономия исходного дизельного топлива составляет 35% для неполного риформинга и 32,5% – для полного;
- температура в конце изобарного сгорания снижается на 106°С для неполного и на 211,4°С – для полного риформинга;
- соответственно, температура отработавших газов снижается на 100°С для неполного риформинга и 173°С – для полного;
- количество теплоты, выводимое из цикла в окружающую среду снижается на 56,1% для неполного и 58,6% для полного риформинга;
- соответственно, коэффициент полезного использования располагаемой теплоты цикла возрастает в 1,5 раза для неполного и в 1,52 раза – для полного риформинга.

Таблица 7.

Интерполированные варианты каталитического риформинга, условно приближенные к традиционному идеализированному циклу Дизеля по совершаемой работе.

	m, г	A, Дж	$Q_{риф}$	$Q_{сгор}$	$Q_{син\text{-}газ}$	Q_1	T_3, К	T_4, К	Q_2	Q_3	η_t	η_q
1	0,2	4094,2	–	7843,36	–	7843,36	2466,0	1400,1	3747,2	3747,2	0,522	0,522
2	0,13	4060,5	1829,32	7200,41	333,0	7533,41	2360,4	1299,5	3473,8	1644,5	0,539	0,782
3	0,135	4085,2	1931,52	7084,1	483,2	7567,3	2254,6	1227,0	3481,3	1549,8	0,540	0,795
1 – вариант традиционного идеализированного цикла Дизеля; 2 – вариант идеализированного цикла Дизеля с неполным каталитическим риформингом; 3 – вариант идеализированного цикла Дизеля с полным каталитическим риформингом.												

Выводы.

1. Теплоты отработавших газов термодинамически более чем достаточно для осуществления как полного, так и неполного каталитического терморифоринга дизельного топлива.

2. При риформинге эмульгированного водой моторного топлива получаемый синтез-газ обогащается свободной водородной фазой за счет разложения воды, повышая тем самым свой энергопотенциал, включая и теплоту отработавших газов на выходе из теплообменного риформера.

3. Получаемый при риформинге синтез-газ имеет более высокие характеристики по кинетике сгорания в сравнении с традиционным жидким дизельным топливом, без недогара и окислов азота.

4. При сгорании синтез-газа снижается термическая составляющая в камере сгорания за счет увеличения паров воды.

5. Наиболее важным является существенное (на 30–35%) снижение расхода моторного топлива при получении адекватной работы двигателя, что весьма актуально в ситуации неуклонного возрастания стоимости углеводородных энергоносителей.

6. Не менее важно для экологии существенное снижение токсичности отработавших газов и тепловых выбросов в окружающую среду.

В дальнейшем планируется проведение опытно-экспериментальных исследований каталитического риформинга в стендовых условиях для оптимизации основных параметрических и технологических характеристик процесса.

ЛИТЕРАТУРА

1. Тенденции и риски развития мировой энергетики [Электронный ресурс]. – Режим доступа : escoecosys.narod.ru/2011_6/art067.
2. Термохимическая регенерация энергии отработавших газов [Электронный ресурс]. – Режим доступа : www.mami.ru/science/autotr.2009/scientific/article/s02/s02_01.pdf.
3. Коняев Е. А. Каталитический риформинг [Электронный ресурс] / Е. А. Коняев. – Режим доступа : www.autorally.ru/pravo/3117/index.html?.
4. Риформинг [Электронный ресурс]. – Режим доступа : www.himi.oglib.ru/bgl/702/277.html.
5. Продукты газификации [Электронный ресурс]. – Режим доступа : www.potram.ru/tehnology7.doc.
6. Эмульгирование [Электронный ресурс]. – Режим доступа : www.dobi.oglib.ru/bgl/6380/706.html.

УДК 629.113

Подзноев Г. П., Абдулгазис У. А., Курдюков А. О.

ТЕРМОДИНАМИКА КАТАЛИТИЧЕСКОГО РИФОРМИНГА ЭМУЛЬГИРОВАННОГО ВОДОЙ МОТОРНОГО ТОПЛИВА ДЛЯ ГАЗОТУРБИННОГО ДВИГАТЕЛЯ

Аннотация. *Проведены термодинамические исследования возможности использования теплоты отработавших газов газотурбинного двигателя для предварительного каталитического риформинга эмульгированного водой моторного топлива в теплообменном реакторе. Расчетным путем установлены основные технологические и параметрические характеристики химической трансформации*

моторного топлива за счет теплоты отработавших газов. Полученные результаты свидетельствуют о термодинамической возможности значительного повышения энергопотенциала продуктов риформинга при снижении расхода углеводородного топлива.

Ключевые слова: *термодинамика газотурбинного двигателя, теплота отработавших газов, водоэмульгированное моторное топливо, каталитический риформинг.*

Подзноєв Г. П., Абдулгазіс У. А., Курдюков О. О.

ТЕРМОДИНАМІКА КАТАЛІТИЧНОГО РИФОРМІНГУ ЕМУЛЬГОВАНОГО ВОДОЮ МОТОРНОГО ПАЛИВА ДЛЯ ГАЗОТУРБІННИХ ДВИГУНІВ

Анотація. *Проведено термодинамічні дослідження можливості використання теплоти відпрацьованих газів газотурбінного двигуна для попереднього каталітичного риформінгу емульгованого водою дизельного палива в теплообмінному реакторі. Розрахунковим шляхом встановлено основні характеристики хімічної трансформації суміші дизельного палива й води при термічному впливі на нього теплової енергії. Отримані результати свідчать про термодинамічні можливості значного підвищення енергопотенціалу продуктів риформінгу, що дозволяє істотно знизити витрату вуглеводневої складової автомобільного палива.*

Ключові слова: *термодинаміка газотурбінного двигуна, теплота відпрацьованих газів, водоемульгіроване моторне паливо, каталітичний риформінг.*

Podznoev G. P., Abdulgazis U. A., Kurdyukov A. O.

THERMODYNAMICS OF CATALYTIC REFORMING OF EMULSIFIED WATER MOTOR FUEL FOR GAS TURBINE ENGINE

Summary. *A thermodynamic study of the possibility of using the exhaust heat of the gas turbine engine for pre-catalytic reforming water of emulsified diesel fuel in the heat exchanger reactor is held. By calculation the basic technological and parametric characteristics of chemical transformation of motor fuel and water mixture by the heat of the thermal energy is ascertained. The results suggest the thermodynamic possibility of a significant increase in the thermodynamic energy potential of reformate while reducing hydrocarbon fuels.*

Thus the authors proposed the schematic diagram of a gas turbine plant with heat exchanger catalytic reactor in which, apart from the exhaust heat recovery, thermochemical reforming water-fuel emulsions extracting hydrogen to the free phase occur, thereby increasing the power consumption of reformate.

Key words: *thermodynamics of gas turbine engine, exhaust heat, water-emulsified fuel engine, catalytic reforming.*

Постановка проблемы. В настоящее время особенно остро стоят проблемы экологичности и экономичности автотранспортных средств, обусловленных в основном низким коэффициентом использования теплоты (35–40%) и высоким уровнем выбросов в атмосферу токсичных отработанных газов на фоне связываемого с этим нарушения теплового баланса планеты и неуклонного истощения природных ресурсов углеводородного топлива.

Анализ литературы. В последнее время предлагается много технических и технологических решений повышения эффективности использования моторных топлив, касающихся в основном поршневых двигателей внутреннего сгорания. В то же время технологически более эффективными являются газотурбинные двигатели (ГТД), позволяющие прямое преобразование тепловой энергии в электрическую без сложной и энергозатратной системы трансформации возвратно-поступательного движения во вращательное движение ведущего вала привода автомобиля. Это позволяет значительно упростить механизм привода и управления автомобилем.

В 50-е годы ряд европейских фирм и крупнейших американских концернов приступили к разработке специальных автомобильных газотурбинных двигателей. В 1950 г. первый газотурбинный автомобиль фирмы Ровер прошел дорожные испытания, а с 1950 по 1960 гг. проходили усиленные поиски оптимальных конструктивных решений и отработкой различных экспериментальных образцов двигателей в дорожных условиях. Сейчас работы по созданию газотурбинных автомобилей проводят практически все крупные автокомпании мира.

С 1955 года на Горьковском автомобильном заводе [1] велись работы по созданию газотурбинного двигателя и в 1956 году были изготовлены первые макетные образцы ГТД ГАЗ-99 мощностью 130 л.с. Но созданные образцы обладали низкой топливной экономичностью. В 1962 году был создан первый в СССР полностью ра-

ботоспособный двигатель ГАЗ-99Б мощностью 175 л.с. Было изготовлено три образца, прошедших испытания на стенде, включая 100-часовые ресурсные. По результатам испытаний получен минимальный удельный расход моторного топлива 320 г/л.с.ч. В 1977 году был разработан и утвержден технический проект унифицированного семейства АГТД ГАЗ, включающего две модели: 902.10 мощностью 380 л.с. и 903.10, развивающий 600 л.с.

В целом ГТД имеют некоторые преимущества [2].

1. Масса и габариты заметно меньше и в ряде моделей она не превышает 25–30% массы объема поршневого двигателя соответствующей мощности. Наряду с повышением грузоподъемности автомобиля сокращение массы двигателя позволяет облегчить подмоторную раму и упростить монтаж силовой установки, а уменьшение габаритов упрощает его компоновку.

2. Топливом может служить любое более дешевое топливо с незначительной регулировкой системы питания при переходе с одного вида топлива на другой.

3. Мощность в одном агрегате может быть поднята практически до любой необходимой для транспортных установок величины при вполне приемлемых размерах и массе.

4. Присущее газотурбинным установкам повышение мощности при низких температурах положительно сказывается на работе в холодное время года.

5. Кривая момента в функции числа оборотов при наличии свободной силовой турбины протекает весьма благоприятно: наибольший момент соответствует заторможенному положению ротора силовой турбины при трогании машины с места. Это позволяет в несколько раз сократить число передач в трансмиссии, а в ряде случаев для легковых автомобилей полностью исключить коробку передач и сцепление. При этом заметно облегчается управление автомобилем.

6. Конструкция ГТД заметно проще, поскольку число рабочих элементов двухвального двигателя в 4–6 раз меньше, чем у традиционного шестицилиндрового карбюраторного двигателя.

7. Особенно важным преимуществом ГТД является непрерывный режим горения при невысоком давлении, что обеспечивает спокойную работу двигателя на любых числах оборотов и существенно упрощает систему регулировки подачи топлива. Отсутствие крутильных колебаний благоприятно сказывается на работе трансмиссии.

8. Большой межремонтный пробег, который обеспечивается вследствие устранения трущихся частей и малыми нагрузками на подшипники.

9. Выпускные газы ГТД менее токсичны, поскольку из-за большого избытка воздуха не образуется монооксись углерода.

10. Для пуска двигателя при низкой температуре воздуха не требуется разогрев масла. Подача масла на подшипники при правильно выбранной его консистентной вязкости обеспечивается при любой температуре атмосферного воздуха. Время приема нагрузки определяется только термическими напряжениями в деталях независимо от температуры масла.

11. Малая масса и небольшие размеры газотурбинных двигателей наряду с возможностью получения большой мощности в одном агрегате и дистанционным управлением позволяют использовать их на большегрузных многоприводных автопоездах с активными прицепами, поскольку в этом случае применяют электротрансмиссии, а наиболее удобным приводом генератора служит более простая и надежная одновальная турбина.

12. Весьма важно, что для газовой турбины не имеет большого значения выбор топлива, качество которого не регламентируется ни октановыми, ни метановыми числами.

Характеризуя газовую турбину, прежде всего следует отметить, что она, как и паровая турбина, может развивать большие обороты. Это дает возможность получать значительную мощность от гораздо меньших по размерам (по сравнению с поршневыми двигателями) и почти в 10 раз более легких по весу двигателей.

Однако, наряду с немалыми достоинствами, газотурбинные двигатели имеют и ряд существенных недостатков [3], которые в какой-то степени объясняют отсутствие серийного выпуска газотурбинных автомобилей. Главный из них – низкий КПД, что обусловлено существенно меньшим тепловым перепадом в рабочем процессе по сравнению с поршневым двигателем. В последнем, благодаря пульсирующему принципу работы, температура достигает 2500°С (а иногда и выше), в то время как температура поршня, как правило, ниже 600°С. Допустимая же по условиям прочности материалов максимальная температура газов перед турбиной компрессора ГТД 900–1180°С, что значительно ниже, чем в камере сгорания поршневого двигателя (1700–1800°С).

Кроме этого, разработанные газотурбинные двигатели рассчитаны на использование углеводородного топлива, что в целом уравнивает их с поршневыми по влиянию на экологический и тепловой баланс природной среды и не снимает зависимость от ресурсной базы углеводородов с ее неуклонным сокращением и неизменным удорожанием.

Таким образом, по многим важным показателям ГТД имеет ключевые преимущества:

- вращательное движение вала является по существу единственным видом движения в газовой турбине;
- газотурбинные двигатели не требуют специальной системы охлаждения;
- высокий ресурс и надежность газотурбинного двигателя;
- газотурбинные автомобили не требуют сложных трансмиссий с коробками передач.

В этом случае основной путь совершенствования ГТД должен идти в направлении получения дополнительной энергии из традиционных источников, максимизации коэффициента полезного использования теплоты и, как следствие, улучшения экологических характеристик действующих и снижения расхода топливно-смазочных материалов. Особое внимание привлекает возможность рационального использования теплоты отработавших газов, которая превышает количество теплоты на совершение полезной работы. Кроме этого, просматривается перспективный вариант трансформации моторного топлива на борту автомобиля с использованием теплоты отработавших газов в более эффективный синтез-газ с повышенным энергопотенциалом [3–6].

Цель статьи – описание термодинамического моделирования каталитического риформинга эмульгированного водой моторного топлива с использованием теплоты отработавших газов и их последующего сжигания в газотурбинной установке для получения электроэнергии.

Изложение основного материала. В задачу исследований входило определение термодинамических параметров и характеристик газотурбинного цикла, которые, как и в обычных циклах поршневых двигателей, определяются начальной температурой, степенью сжатия (ε), показателем адиабаты (k) и степенью предварительного расширения в процессе сгорания синтез-газа. Также оценивалась зависимость рассчитанных значений параметров (температуры и давления), термического КПД (η) и совершаемой работы (A) от квоты добавочной воды, степени сжатия, и энергетического баланса цикла. Последний складывался из части теплоты отработавших газов, затрачиваемой на каталитический риформинг ($Q_{риф}$), теплосодержания синтез-газа после риформера ($Q_{син\text{-}газ}$), теплоты сгорания ($Q_{сгор}$) синтез-газа в камере сгорания.

Подобная система, помимо рекуперации теплоты отработавших газов двигателя, позволяет за счет термохимического риформинга водотопливной эмульсии моторного топлива извлечь водород из воды в свободную фазу, повышая тем самым энергоемкость продуктов риформинга.

Моторное топливо и вода подаются раздельно в смеситель-эмульгатор, откуда эмульгированная фаза поступает во вход насоса высокого давления, подающего смесь в трубчатый теплообменник с катализатором.

Принципиальная схема газотурбинного двигателя с подводом теплоты при постоянном давлении основана на следующей последовательности операций (рис. 2).

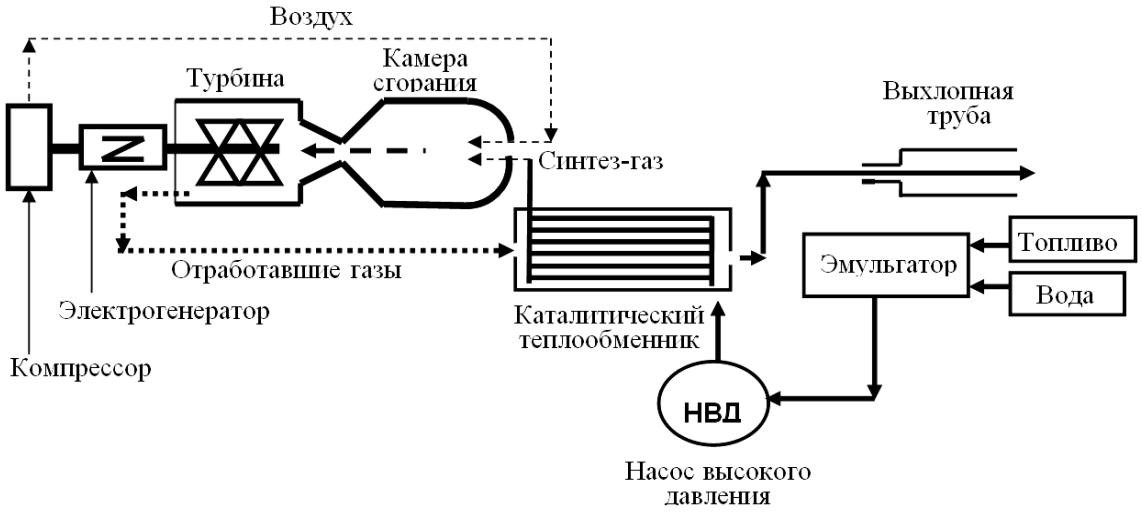


Рис. 2. Принципиальная схема газотурбинного двигателя с теплообменным каталитическим реактором.

В камеру сгорания через форсунки поступает воздух от осевого компрессора и синтез-газ из каталитического риформера. Из камеры сгорания горячие газы через комбинированные сопла направляются на лопатки газовой турбины с последующим выходом в теплообменник каталитического риформера. Вращение вала турбины передается осевому компрессору и электрогенератору и далее тяговому электродвигателю. Отработавшие газы после турбины охлаждаются с передачей остаточного тепла оборотной воде для эмульгирования моторного топлива.

Топливный насос, также приводимый в движение от вала турбины, нагнетает эмульгированное топливо в каталитический теплообменник – риформер с катализатором для генерирования синтез-газа.

Расчет термокаталитического реактора

Время катализа – 3 мин.

Исходные продукты (масса):

$C_{15}H_{32}$ – 0,005 г · 2000 мин$^{-1}$ · 3 мин = 30 г.

H_2O – 0,00638 г · 2000 мин$^{-1}$ · 3 мин = 38,28 г.

Исходные продукты (объем):

$C_{15}H_{32}$ – 30 г : 0,8 г/см^3 = 37,5 см^3;

H_2O – 38,28 г : 1,0 г/см^3 = 38,0 см^3;

Σ = 75,5 см^3 за 3 мин при частоте вращения коленчатого вала n = 2000 мин$^{-1}$.

Объем прокачки через насос высокого давления:

75,5 см^3 / 3 мин = 25 см^3/мин (1500 см^3/час) жидкой фазы.

Объем конечных продуктов:

(CO + H_2) = 0,008651 + 0,017772 = 0,026423дм^3.

При 298°К и 1 × 10^5 Па за цикл 0,06207 дм^3;

при 700°К и 1 × 10^5 Па за цикл 1,24 см^3;

при 700°К и 50 × 10^5 Па за цикл 0,06207 м^3.

Тогда при n = 2000 мин$^{-1}$ за 3 мин объем конечных продуктов составит 372,4 дм^3.

Объем ресивера после реактора:

7,45 дм^3 при 700°К и 50 × 10^5 Па на 3 мин.

Объем катализатора Нихром Х20Н80:

Ni (73–78%); Cr (19–21%); Si (1%); Mn (0,7%);

Fe (проволока) – 75,5 см^3.

Всего объем реактора:

75,5 см^3 + 75,5 см^3 = 151 см^3.

Расчет внутреннего диаметра реактора при l = 30 см:

$$V = \pi \cdot r^2 \cdot l:$$

$$r = \sqrt{\frac{V}{\pi \cdot l}} = \sqrt{\frac{151\,\text{см}^3}{3{,}14 \cdot 30\,\text{см}}} = \sqrt{1{,}603\,\text{см}^2} = 1{,}27\,\text{см};$$

d = 2,54 см.

Расчет внутреннего диаметра теплообменника при зазоре канала для прохода газов, равном 1,5 см:

D = 2,54 + 3,0 = 5,54 см.

Риформинг исходных продуктов протекает с поглощением тепла отработавших газов, которое затрачивается на разрыв связей между атомами молекулы. Кроме этого, часть теплоты расходуется также на испарение сырья и нагрев его до рабочей температуры каталитического риформинга.

В идеальном варианте парового риформинга топлива образуется синтез-газ. В зависимости от условий проведения риформинга процесс может осуществляться по двум основным направлениям:

1) неполный риформинг:

$C_{15}H_{32}$ + 15H_2O + Q-катализ = 15CO + 31H_2;

2) полный риформинг:

$C_{15}H_{32}$ + 30H_2O + Q-катализ = 15CO_2 + 62H_2.

Получаемый синтез-газ состоит в идеализированном процессе практически только из водорода и монооксида (диоксида) углерода с более высокой теплотой сгорания в сравнении с исходными углеводородами, повышенным октановым и цетановым числами и более чистым выхлопом при его сгорании.

Для сравнительного термодинамического анализа принята единичная квота дизельного топлива в 0,2; 0,15 и 0,1 г на один рабочий цикл идеализированного газотурбинного цикла с объемом камеры сгорания 3,0 дм^3.

Из приведенных в табл. 1–4 расчетов следует, что при одинаковых значениях давления и температуры на входе в камеру сгорания их величина прямо зависит от количества подаваемого синтез-газа. При этом для варианта полного риформинга температура выше, чем для варианта неполного риформинга. Соответственно отмеченной зависимости изменяются коэффициент полезного действия и совершаемая работа.

Таблица 1.

Стехиометрический расчет материального баланса неполного риформинга моторного топлива.

	Исходные продукты			**Конечные продукты**		
	$C_{15}H_{32}$	**15H_2O (жидкость)**	**Σ**	**15CO**	**31H_2**	**Σ**
Мольная масса, г	212	270	482	420	62	482
Масса топлива, г (по вариантам)	0,2 0,15 0,1	0,2547 0,1910 0,1274	0,4547 0,3410 0,2274	0,3962 0,2971 0,1981	0,0585 0,439 0,0292	0,4547 0,3410 0,0274
Моли, μ (по вариантам)	0,000943 0,00071 0,000472	0,01415 0,010610 00708	0,015093 0,011317 0,00755	0,01415 0,01061 0,007075	0,02925 0.02195 0,0146	0,04547 0,03256 0,021675
$(\Delta H_{кон} - \Delta H_{исх})\cdot\mu$	+2814,0 Дж / 0,2 г $C_{15}H_{32}$ +2110,32 Дж / 0,15 г $C_{15}H_{32}$ +1406,98 Дж / 0,1 г $C_{15}H_{32}$					

Таблица 2.

Стехиометрический расчет материального баланса сгорания продуктов неполного риформинга дизтоплива.

		15CO	**31H_2**	**23O_2**	**N_2**	**Σ**	**15CO_2**	**31H_2O (газ)**	**N_2**	**Σ**
Мольная масса, г		420	62	736		1218	660	558		1218
Масса, г	0,2	0,39623	0,05849	0,69435	2,25595	3,40502	0,62265	0,52642	2,25595	3,40502
	0,15	0,29717	0,04387	0,52076	1,69195	2,55375	0,46698	0,39481	1,69195	2,55374
	0,1	0,19811	0,02925	0,34716	1,12793	1,70245	0,31132	0,26320	1,12793	1,70245
Объем, $дм^3$	0,2	0,34602	0,71100	0,53040	1,97007	3,55749				
	0,15	0,25951	0,53328	0,39780	1,47754	2,66813				
	0,1	0,17301	0,35556	0,26520	0,98500	1,77877				
Моли, μ	0,2	0,01415	0,02925	0,02170	0,08057	0,14670	0,01415	0,02925	0,08057	0,12397
	0,15	0,01061	0,02194	0,01623	0,06043	0,10921	0,01061	0,02194	0,06043	0,09298
	0,1	0,007078	0,01463	0,01085	0,04028	0,07284	0,007078	0,01463	0,04028	0,061988
$(\Delta H_{кон} - \Delta H_{исх})\mu$		+2814,0 Дж / 0,2 г $C_{15}H_{32}$ +2110,32 Дж / 0,15 г $C_{15}H_{32}$ +1406,98 Дж / 0,1 г $C_{15}H_{32}$								

Таблица 3.

Стехиометрический расчет материального баланса полного риформинга дизтоплива.

	$C_{15}H_{32}$	**30H_2O (жидкость)**	**Σ**	**15CO_2**	**46H_2**	**Σ**
Мольная масса, г	212	540	752	660	92	752
Масса, г	0,2	0,5094	0,7094	0,6226	0,0868	0,7094
	0,15	0,3821	0,5321	0,4670	0,0651	0,5321
	0,1	0,2547	0,3547	0,3113	0,0434	0,3547
Моли, μ	0,0009434	0,0283	0,0292	0,01415	0,0434	0,05755
	0,0007075	0,02123	0,0219375	0,01061	0,03255	0,04316
	0,0004717	0,01415	0,0146217	0,007075	0,0217	0,028775
$(\Delta H_{кон} - \Delta H_{исх})\cdot\mu$	+2853,87 Дж / 0,2 г $C_{15}H_{32}$ +2140,25 Дж / 0,15 г $C_{15}H_{32}$ +1426,93 Дж / 0,1 г $C_{15}H_{32}$					

Таблица 4.

Стехиометрический расчет материального баланса сгорания синтез-газа продуктов полного риформинга дизтоплива.

		15CO_2	**46H_2**	**23O_2**	**N_2**	**Σ**	**46H_2O**	**N_2**	**15CO_2**	**Σ**
Мольная масса, г		660	92	736		828	828			828
Масса, г	0,2	0,62264	0,08679	0,69434	2,25593	3,65970	0,78113	2,25593	0,62264	3,65970
	0,15	0,46698	0,06509	0,52075	1,69193	2,74475	0,58585	1,69193	0,46698	2,74476
	0,1	0,31132	0,04340	0,34717	1,12796	1,82985	0,39057	1,12796	0,31132	1,82985
V	0,2	0,34379	1,05501	0,53040	1,97006	3,89926				
	0,15	0,25784	0,79122	0,39780	1,47753	2,92439				
	0,1	0,17190	0,52757	0,26520	0,98503	1,94970				
Моли, μ	0,2	0,01415	0,04340	0,02167	0,08057	0,15983	0,04340	0,08057	0,01415	0,13812
	0,15	0,01061	0,03255	0,01627	0,06043	0,11986	0,03255	0,06043	0,01061	0,10359
	0,1	0,007075	0,02170	0,01085	0,04028	0,08090	0,02170	0,04028	0,007075	0,069055
ΔH	–10494,7 Дж / 0,2 г $C_{15}H_{32}$ –7871,9 Дж / 0,15 г $C_{15}H_{32}$ –5247,9 Дж / 0,1 г $C_{15}H_{32}$									

Из расчетов также следует, что при неполном риформинге дизтоплива требуется ввод в систему 2814,0 Дж внешней теплоты на единичный заряд 0,2 г $C_{15}H_{32}$, а при полном – 2853,87 Дж. Тепловой же эффект сгорания продуктов неполного риформинга 0,2 г $C_{15}H_{32}$ составляет 11078,3 Дж, а при полном риформинге – 10495,9 Дж, что выше теплоты сгорания адекватного количества по массе исходного дизтоплива (8882,1 Дж), соответственно, на 12,4% и 11,8%.

Кроме этого, следует также учитывать, что синтезируемый в процессе терморифоринга синтез-газ будет выходить из каталитического теплообменного реактора при температуре, близкой к таковой отработавших газов (условно принятой для расчетов 750°К). Адекватное этому теплосодержание риформингового синтез-газа в варианте неполного риформинга ($CO + H_2$) для варианта 0,2 г составит +516,2 Дж, для 0,15 г – +384,2, для 0,1 г – +255,8 Дж. Для полного ри-

форминга ($CO_2 + H_2$) эти значения составят, соответственно, +758,4 Дж на квоту 0,2 г, +536,9 Дж на квоту 0,15 г и +382,3 Дж на квоту 0,1 г. Таким образом, в процесс привносится дополнительная внешняя теплота, суммируемая с теплотой сгорания синтез-газа.

Учитывая, что в рассмотренном цикле теплота отработавших газов не сбрасывается в окружающее пространство, а продолжает участвовать в формировании теплового баланса цикла, то завершающей стадией последнего следует считать вывод отработавших газов после каталитического риформера с существенно более низкими тепловыми температурными характеристиками. В этом случае в определении коэффициента полезного действия цикла частное от деления выводимой теплоты к вводимой будет меньше и, соответственно, КПД будет выше.

Таким образом, снимается основной недостаток традиционных газотурбинных двигателей относительно низкого термического КПД в сравнении с поршневыми двигателями.

Обобщенные результаты термодинамического анализа идеализированного газотурбинного цикла с предварительным каталитическим термориформингом эмульгированного водой дизельного топлива с использованием теплоты отработавших газов сведены в табл. 5.

Таблица 5.

Параметрические характеристики вариантов идеального термодинамического цикла газотурбинной установки с предварительным термокаталитическим риформингом моторного топлива.

Параметры цикла*	**Неполный каталитический риформинг 0,2г $C_{15}H_{32}$**	**Неполный каталитический риформинг 0,15 г $C_{15}H_{32}$**	**Неполный каталитический риформинг 0,1 г $C_{15}H_{32}$**	**Полный каталитический риформинг 0,2 г $C_{15}H_{32}$**	**Полный каталитический риформинг 0,15 г $C_{15}H_{32}$**	**Полный каталитический риформинг 0,1 г $C_{15}H_{32}$**
$Q_{риф}$, Дж	–2814,0	–2110,32	–1406,98	–2853,87	–2140,25	–1426,93
$Q_{син\text{-}газ}$, Дж	+516,2	+384,2	+255,8	+758,4	+536,9	+383,2
$Q_{сгор}$, Дж	11078,27	8311,02	5533,09	11253,05	8408,79	5630,23
Q_1, Дж	11594,47	8695,22	5788,9	11253,1	8408,8	5631,1
$P_{2,3}$, $\times 10^5$ Па	50,0	50,0	50,0	50,0	50,0	50,0
T_2, К	750,0	750,0	750,0	750,0	750,0	750,0
T_3, К	3049,9	3052,2	3048,8	2767,1	2759,4	2769,0
P_4, $\times 10^5$ Па	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0
T_4, К	1195,0	1196,0	1194,7	1086,5	1086,2	1093,5
Q_2, Дж	3860,1	2898,4	1929,6	3788,9	2848,1	1922,9
η	0,603	0,608	0,608	0,608	0,606	0,605
A, Дж	7061,0	5286,7	3519,65	6841,9	5095,7	3406,8

*Примечания: $Q_{риф}$ – теплота, расходуемая на риформинг эмульгированного водой моторного топлива;
$Q_{син\text{-}газ}$ – теплосодержание синтез-газа после риформинга;
$Q_{сгор}$ – теплота сгорания синтез-газа;
Q_1 – теплота, введенная в адиабатный процесс;
P_2 – давление адиабатного сжатия топливной фазы перед сгоранием;
P_3 – давление изобарного сгорания топливной фазы;
P_4 – давление на лопатках турбины в конце адиабатного расширения;
T_2 – температура топливной фазы на входе в камеру сгорания;
T_3 – температура газовой фазы на выходе из камеры сгорания;
Q_2 – теплосодержание отработавших газов перед риформингом;
η – термодинамический коэффициент полезного действия цикла;
A – работа, проделанная рабочим телом на лопатках турбины.

Выводы.

1. Включение в систему энергопривода автомобиля предварительного термокаталитического риформинга существенно улучшает термодинамику процесса. При этом исходное моторное топливо трансформируется в синтез-газ, характеризующийся более высоким потенциальным теплосодержанием вследствие выделения химически связанного водорода воды в самостоятельную газовую фазу.

2. Расчеты свидетельствуют, что теплоты отработавших газов достаточно для проведения каталитического риформинга эмульгированного топлива. При этом часть теряемой теплоты возвращается в цикл, повышая тем самым общую теплоту, вводимую в процесс.

3. Характер и качества получаемого при каталитическом риформинге энергоносителя (синтез-газа) малопригодны для использования в циклах поршневых двигателей внутреннего сгорания ввиду наличия в его составе легко воспламеняющегося водорода (для цикла Отто на стадии адиабатного сжатия топливной смеси) и необходимости использования высокого давления

на компрессию газовой фазы при ее введении в камеру сгорания (для цикла Дизеля после адиабатного сжатия воздуха).

4. Использование предварительного каталитического риформинга топлива на борту автомобиля позволит:

- на 20–25% снизить расход топлива при сохранении количества полезной работы двигателя;
- улучшить процесс газосмешения и кинетику сгорания;
- снизить выбросы CO_2 в окружающую среду и полностью исключить выбросы монооксида углерода.

На следующем этапе исследовательских работ планируется разработка экспериментального стенда для оптимизации режимов совмещенной работы всех узлов схемы риформинга и газотурбинной установки по основным технологическим характеристикам и параметрам.

ЛИТЕРАТУРА

1. Газогенераторная техника в разных странах [Электронный ресурс]. – Режим доступа : http://alternativenergy.ru/knigi/002/233-gazifikaciya-tverdyh-topliv-ch-4.html.
2. Продукты газификации [Электронный ресурс]. – Режим доступа : http://auto-dnevnik.com/docs/index-2603.html.
3. Древесный уголь [Электронный ресурс]. – Режим доступа : http://charcoal.mybb.ru/viewtopic.php?id=153.
4. Сравнительный анализ: методы получения синтез-газа [Электронный ресурс]. – Режим доступа : http://uchil.net/?cm=106356.
5. Получение водосодержащего газа на борту и использование его в ДВС [Электронный ресурс]. – Режим доступа : www.istc.ru/ISTC/ISTC.nsf/va_WebResources/.../$File/gazel.RUS.pdf.
6. Корабельников А. В. Химическая регенерация тепла и преобразования топлива в энергетических установках [Электронный ресурс] / А. В. Корабельников, А. В. Куранов, С. С. Рыжиков. – Режим доступа : http://www.chemphys.edu.ru/pdf/2006-10-12-002.pdf.

УДК 629.016

Подригало М. А., Абрамов Д. В.

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ЗАВИСИМОСТИ КОЭФФИЦИЕНТА СЦЕПЛЕНИЯ ШИНЫ С ОПОРНОЙ ПОВЕРХНОСТЬЮ ОТ КИНЕМАТИЧЕСКОГО ПАРАМЕТРА КОЛЕСА

Аннотация. *Во избежание трудностей, связанных с измерением динамического радиуса в ходе проведения экспериментальных исследований и использования относительного скольжения шины в пятне контакта, в качестве характеристики взаимодействия колеса с дорогой предложено использовать кинематический параметр K, зависящий от свободного радиуса, угловой скорости колеса и линейной скорости оси колеса. Разработана методика построения зависимости коэффициента сцепления колес с дорогой от кинематического параметра K для дальнейшего ее использования в работе антиблокировочных и противобуксовочных систем автомобиля.*

Ключевые слова: *колесо, коэффициент сцепления, относительное буксование, кинематический параметр, радиальная деформация.*

Подригало М. А., Абрамов Д. В.

ВИЗНАЧЕННЯ ЗАЛЕЖНОСТІ КОЕФІЦІЄНТА ЗЧЕПЛЕННЯ ШИНИ З ОПОРНОЮ ПОВЕРХНЕЮ ВІД КІНЕМАТИЧНОГО ПАРАМЕТРУ КОЛЕСА

Анотація. *Щоб уникнути труднощів, пов'язаних із вимірюванням динамічного радіуса в ході проведення експериментальних досліджень і використання відносного ковзання шини в плямі контакту, у якості характеристики взаємодії колеса з дорогою запропоновано використовувати кінематичний параметр K, що залежить від вільного радіуса, кутової швидкості колеса й лінійної швидкості осі колеса. Розроблено методику побудови залежності коефіцієнта зчеплення коліс із дорогою від кінематичного параметра K для подальшого її використання в роботі антиблокувальних і протибуксувальних систем автомобіля.*

Ключові слова: *колесо, коефіцієнт зчеплення, відносне буксування, кінематичний параметр, радіальна деформація.*

Podrygalo M. A., Abramov D. V.

DEFINITION OF DEPENDENCE OF TIRE-TO-SURFACE TRACTION COEFFICIENT ON KINEMATIC WHEEL PARAMETERS

Summary. *In the paper the construction of the dependence of the traction on the relative sliding of the kinematic parameters of the tire contact with the road is proposed.*

To avoid the difficulties associated with the measurement of the dynamic range in the course of experimental research and the use of relative sliding of a tire in the contact patch, it is offered to use the kinematic parameter K depending on the free radius, rotational speed of the wheel and the linear speed of the wheel axis as the characteristics of the interaction with the road wheels. The technique of plotting the grip coefficient of the kinematic parameter K for further use in the anti-lock and traction control car is developed.

The boundaries of the range of deformation parameter of the wheel and an algorithm for constructing kinematic parameter wheel are developed. The results are obtained by experimental diagram for wheel ZIL-4335 bus with the tire 11,0-R20.

Key words: *wheel, traction coefficient, relative slippage, kinematic parameter, radial deformation.*

Постановка проблемы. Метод экспериментальной оценки параметра контакта колеса с дорогой с использованием датчиков линейных и угловых ускорений, учитывающий как деформацию шины под действием приложенной нагрузки, так и скольжение в пятне контакта, позволяет обойти проблему определения динамического радиуса колеса, особенно при его движении по деформируемой поверхности. В рамках этого метода в качестве характеристики контакта колеса с дорогой предложено использовать кинематический параметр *K*, зависящий от свободного радиуса, угловой скорости колеса и от линейной скорости оси колеса.

Анализ последних достижений и публикаций. Кинематический параметр колеса *K* определяется по формуле [1]

$$K = \frac{V_0}{\omega_к \cdot r_0} = (1 - S_x) \cdot (1 - \lambda_z), \qquad (1)$$

где V_0 – скорость оси колеса (равна скорости автомобиля);

$\omega_к$ – угловая скорость колеса;

r_0 – свободный радиус колеса [2], определяемый при отсутствии нормальной нагрузки P_z на колесо;

S_x – относительное буксование ведущих колес автомобиля;

λ_z – параметр радиальной деформации колеса.

$$\lambda_z = \frac{P_z}{c_z \cdot r_0}, \qquad (2)$$

где P_z – нормальная нагрузка на колесо;

c_z – радиальная жесткость шины.

Относительное буксование колеса часто используется в качестве аргумента функции определения реализуемого коэффициента сцепления колеса с опорной поверхностью $\varphi_x = f(S_x)$.

На рис. 1 представлена $\varphi - S$ диаграмма [3], полученная экспериментальным путем на стенде с беговым барабаном. Экспериментальная кривая реализуемого коэффициента сцепления была получена для колеса автомобиля ЗиЛ-4335 с шиной 11,0-R20 в тормозном режиме при следующих начальных условиях: усилие прижатия колеса к беговому барабану 27000 Н; начальная скорость торможения 60 км/ч; давление в шине 0,65 МПа; максимальное давление в тормозной камере 0,8 МПа; время срабатывания тормозного крана 0,18 с; время наполнения тормозной камеры от 0 до 0,8 МПа – 0,5 с [3].

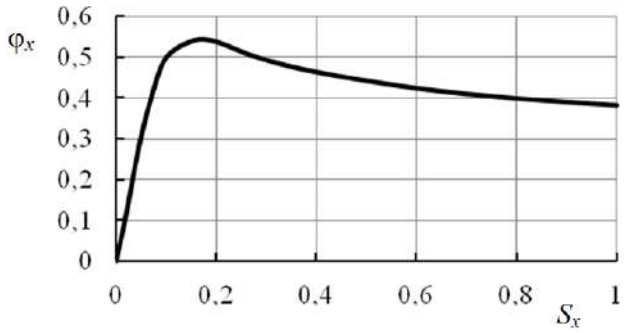


Рис. 1. Экспериментально полученная $\varphi_x - S_x$ диаграмма для колеса автомобиля ЗиЛ-4335 с шиной 11,0-R20 [3].

При переходе от тормозного к тяговому режиму величина относительного буксования колеса S_x в функции реализуемого коэффициента сцепления колеса с опорной поверхностью φ_x изменяет лишь знак, что позволяет судить об идентичности $\varphi_x - S_x$ диаграмм в тормозном и тяговом режимах [4].

Цель статьи – построение зависимости коэффициента сцепления колес с дорогой от кинематического параметра *K* для дальнейшего ее использования в алгоритмах антиблокировочных и противобуксовочных систем автомобиля.

Для достижения указанной цели необходимо определить границы диапазона изменения параметра радиальной деформации колеса и разработать алгоритм построения указанной выше зависимости.

Изложение основного материала. Диапазон изменения параметра радиальной деформации колеса λ_z будет ограничен из следующих условий. При высоких значениях радиальной жесткости шины ($c_z \to \infty$) значение параметра радиальной деформации колеса, согласно зависимости (2), будет стремиться к нулю ($\lambda_z \to 0$). Таким образом, λ_z будет всегда больше нуля. Для определения верхней границы изменения λ_z учтем, что [5]

$$S_x = 1 - \frac{V_0}{\omega_к \cdot r_д}, \qquad (3)$$

где $r_д$ – динамический радиус колеса.

Подставив выражение (3) в формулу (1), получим

$$\frac{V_0}{\omega_к \cdot r_0} = \frac{V_0}{\omega_к \cdot r_д} \cdot (1 - \lambda_z) \cdot \qquad (4)$$

Откуда

$$\lambda_z = 1 - \frac{r_д}{r_0} \cdot \qquad (5)$$

Согласно выражению (5) λ_z примет максимальное значение при минимальном $r_д$ для конкретного колеса, которое не может быть меньше радиуса обода колеса $r_{об}$. Таким образом,

$$\lambda_{z\max} = 1 - \frac{r_{об}}{r_0} \cdot \qquad (6)$$

Для большинства шин нормального профиля можно принять $r_{об} / r_0 \approx 0{,}6$. Тогда $\lambda_{z\max} = 0{,}4$.

Таким образом, диапазон изменения параметра радиальной деформации колеса $0 < \lambda_z \le 0{,}4$.

Подставив в формулу (1) значения S_x при определенных значениях реализуемого коэффициента сцепления φ_x, полученных из диаграммы, представленной на рис. 1, получим возможность построить графики зависимости φ_x от кинематического параметра колеса K при различных значениях параметра радиальной деформации колеса λ_z, как это показано на рис. 2, 3.

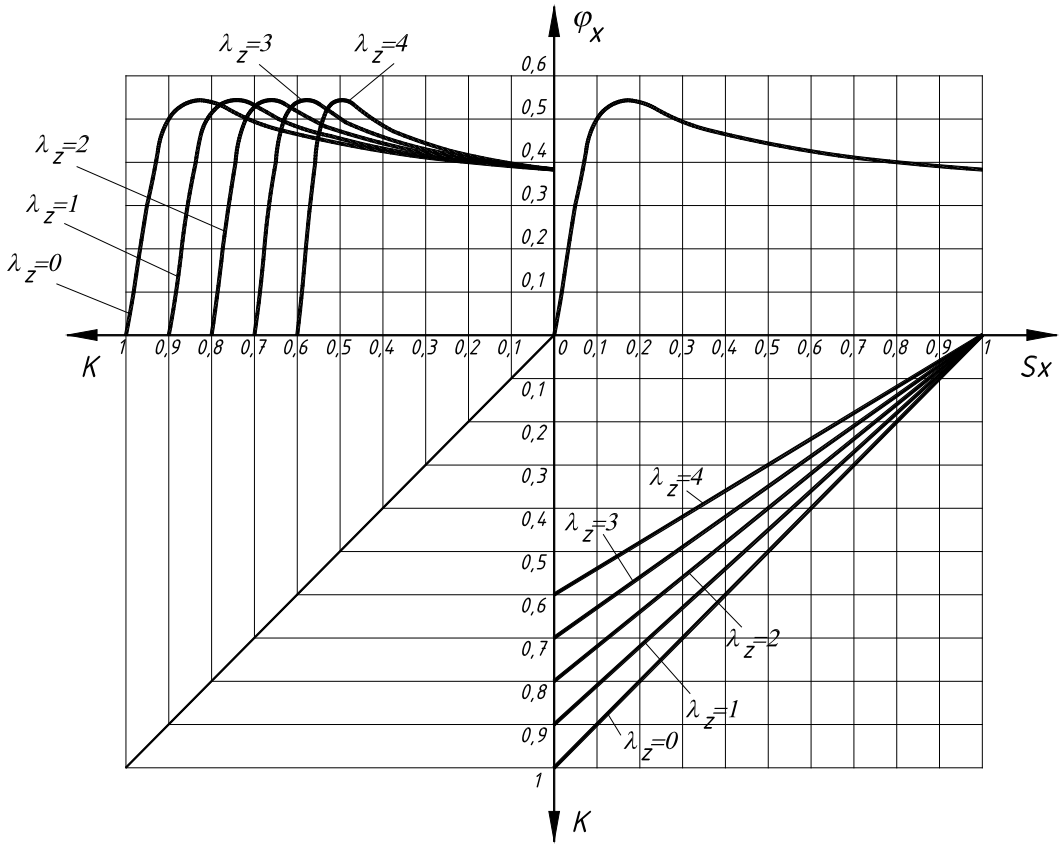


Рис. 2. Преобразование графика функции $\varphi_x = f(S_x)$ в график функции $\varphi_x = f(K)$ при различных значениях параметра радиальной деформации колеса λ_z.

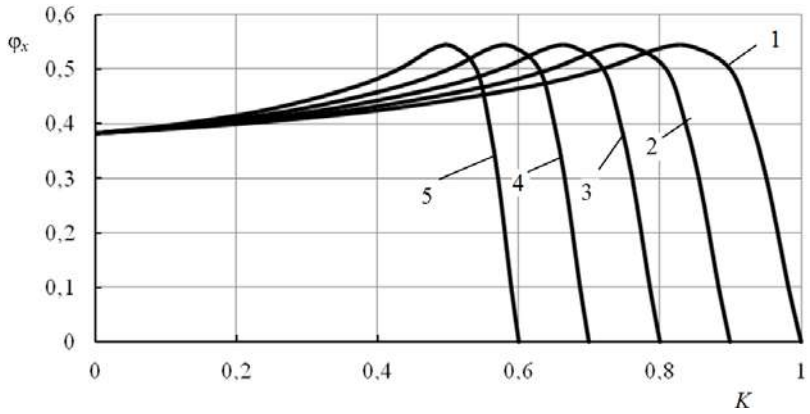


Рис. 3. Графики зависимости реализуемого коэффициента сцепления колеса с опорной поверхностью φ_x от кинематического параметра колеса K при различных значениях параметра радиальной деформации колеса λ_z для колеса автомобиля ЗиЛ-4335 с шиной 11,0-R20: 1 – при $\lambda_z = 0$; 2 – при $\lambda_z = 0{,}1$; 3 – при $\lambda_z = 0{,}2$; 4 – при $\lambda_z = 0{,}3$; 5 – при $\lambda_z = 0{,}4$.

Выводы.

1. Вследствие возникновения трудностей, связанных с измерением динамического радиуса колеса в ходе проведения экспериментальных исследований, использование относительного скольжения шины в пятне контакта в качестве характеристики взаимодействия колеса с дорогой затруднено. Поэтому в качестве такой характеристики ранее предложено использовать кинематический параметр *K*.

2. Параметр радиальной деформации колеса λ_z, учитываемый при определении кинематического параметра *K*, для большинства шин нормального профиля будет лежать в диапазоне от 0 до 0,4.

3. Построение графика зависимости коэффициента сцепления колес с дорогой от кинематического параметра *K* контакта шины с дорогой позволит в дальнейшем использовать его в алгоритмах работы антиблокировочных и противобуксовочных устройств.

ЛИТЕРАТУРА

1. Радиус качения и оценка взаимодействия колеса мобильной машины с дорогой / [А. Т. Лебедев, Н. П. Артемов, М. А. Подригало, А. В. Кот] // Механізація сільськогосподарського виробництва. Вісник Харківського національного технічного університету сільського господарства імені Петра Василенка. Технічні науки. – 2012. – Вип. 124. – Т. 2. – С. 43–48.
2. Работа автомобильной шины / [В. И. Кнород, Е. В. Кленников, И. П. Петров и др.] ; под ред. В. И. Кнорода. – М. : Транспорт, 1976. – 238 с.
3. Методы расчета реализуемого коэффициента сцепления при качении колеса в тормозном режиме / [А. Н. Туренко, С. И. Ломака, Л. А. Рыжих, Д. Н. Леонтьев, А. В. Быкадоров] // Автомобильный транспорт. – Харьков : ХНАДУ, 2010. – Вып. 27. – С. 7–12.
4. Стабильность эксплуатационных свойств колесных машин / [М. А. Подригало, В. П. Волков, В. А. Карпенко, Е. М. Гецович и др.]. – Харьков : ХНАДУ, 2003. – 614 с.
5. Петрушов В. А. Сопротивление качению автомобилей и автопоездов / В. А. Петрушов, С. А. Шуклин, В. В. Московкин. – М. : Машиностроение, 1975. – 225 с.

УДК 629.017

Подригало М. А., Артёмов Н. П., Клец Д. М., Гацько В. И.

ОБЕСПЕЧЕНИЕ УПРАВЛЯЕМОСТИ И УСТОЙЧИВОСТИ МОБИЛЬНЫХ МАШИН ПРИ УСТАНОВИВШЕМСЯ ДВИЖЕНИИ

Аннотация. *Получены зависимости, позволяющие определять соотношения суммарных боковых жесткостей передних и задних колес автомобиля, при которых частота собственных колебаний исследуемого автомобиля в плоскости дороги будет соответствовать верхнему пределу способности человека производить поворот при маневрах с двойным переходом с одной полосы на другую. Определены оптимальные соотношения суммарных боковых жесткостей передних и задних колес мобильной машины с точки зрения обеспечения ее управляемости и устойчивости.*

Ключевые слова: *мобильная машина, управляемость, устойчивость, установившееся движение, частота собственных колебаний.*

Подригало М. А., Артьомов М. П., Клец Д. М., Гацько В. І.

ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ КЕРОВАНОСТІ ТА СТІЙКОСТІ МОБІЛЬНИХ МАШИН ПРИ УСТАЛЕНОМУ РУХОВІ

Анотація. *Отримано залежності, які дозволяють визначати співвідношення сумарних бічних жорсткостей передніх і задніх коліс автомобіля, при яких частота власних коливань досліджуваного автомобіля в площині дороги буде відповідати верхній межі здатності людини робити поворот при маневрах із подвійним переходом із однієї смуги на іншу. Визначено оптимальні співвідношення сумарних бічних жорсткостей передніх і задніх коліс мобільної машини з точки зору забезпечення її керованості та стійкості.*

Ключові слова: *мобільна машина, керованість, стійкість, усталений рух, частота власних коливань.*

Podrygalo M. A., Artemov N. P., Klets D. M., Gatsko V. I.

SECURING ROADABILITY AND STABILITY OF MOBILE MACHINES FOR STEADY MOTION

Summary. *The article reveals the ways to secure roadability and stability of mobile machines for steady motion by adjusting its natural frequency in the plane of the road. The dependencies defining the ratio of the total roll stiffness of the front and rear wheels of the car in which the natural frequency of the test vehicle in the road plane will correspond to the upper limit of a person's ability to make a turn when maneuvering dou-*

ble transition from one band to another are shown. The optimum ratio of total lateral stiffness of the front and rear wheels of the mobile machine in terms of its roadability and stability is defined. The frequency of natural oscillations of the vehicle when it is straight and steady motion on steady rotation is revealed.

Key words: *mobile machine, roadability, stability, steady motion, natural frequency.*

Постановка проблемы. Обеспечение постоянного курсового угла и заданного радиуса поворота автомобиля при установившемся движении осуществляется водителем (или автоматическим управляющим устройством) путём постоянного воздействия на рулевое колесо. Указанное воздействие имеет колебательный характер с частотой, достигающей 0,7 Гц. Частота собственных колебаний в плоскости дороги автомобилей с недостаточной поворачиваемостью также находится в диапазоне от 0,4 до 0,7 Гц, что создаёт условия для возникновения резонанса и сдвига колебаний по фазе, а также нарушения управляемости и устойчивости автомобилей.

Анализ последних достижений и публикаций. В работе [1] приведены результаты экспериментальных исследований управляемости автомобилей, показавшие, что частота синусоидальной кривой, используемой для осуществления маневра по траектории усечённой синусоиды за счёт соответствующего поворота рулевого колеса, составляет 0,7 Гц. Эти результаты были получены на основании многочисленных исследований верхнего предела способности человека производить поворот при маневрах с двойным переходом с одной полосы на другую [1]. Результаты указанных исследований использованы в международном стандарте [2] при определении условий проведения испытаний автомобилей на устойчивость. При определении угловой жесткости автомобиля в плоскости дороги, обусловленной боковой податливостью шин, необходимо учитывать не коэффициенты сопротивления бокового увода, а коэффициенты боковой жесткости шин.

Целью статьи – получение зависимостей для обеспечения управляемости и устойчивости мобильной машины при установившемся движении за счет корректировки его частоты собственных колебаний в плоскости дороги.

Для достижения указанной цели необходимо определить частоты собственных колебаний автомобиля при установившемся прямолинейном движении и при установившемся повороте, а также частоты собственных колебаний машинно-тракторного агрегата при выполнении транспортных операций.

Изложение основного материала.

Определение частоты собственных колебаний автомобиля при его прямолинейном установившемся движении и на установившемся повороте. На рис. 1 приведена схема нагружения автомобиля поворачивающим моментом при установившемся прямолинейном движении.

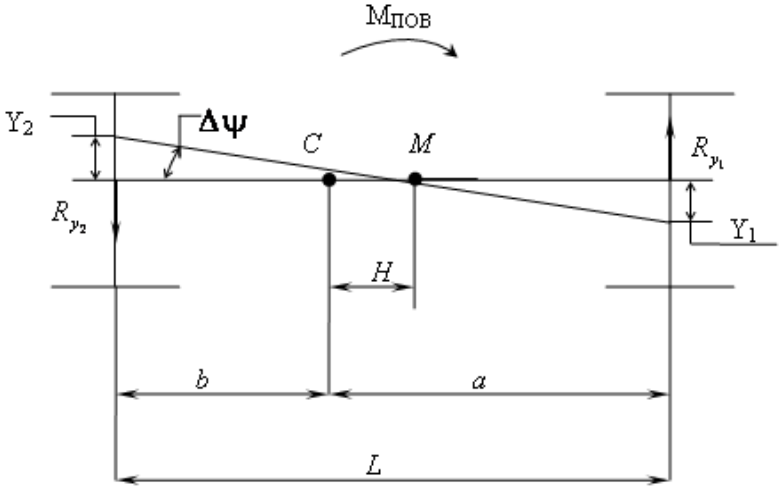


Рис. 1. Схема нагружения автомобиля поворачивающим моментом: *C* – центр масс автомобиля; *M* – центр упругости автомобиля в плоскости дороги; R_{y_1}, R_{y_2} - суммарные боковые реакции дороги на передних и задних колесах.

Из рис. 1 определим

$$\Delta\psi = \frac{Y_2}{b+H} = \frac{Y_1}{a-H}, \qquad (1)$$

где *a, b* – расстояния от проекции центра масс автомобиля на горизонтальную плоскость до передней и задней осей, соответственно;

Y_1, Y_2 – боковые деформации шин, обусловленные действием боковых реакций дороги R_{y_1} и R_{y_2};

$$Y_1 = R_{y_1} / C_{y_1}\ ;\ Y_2 = R_{y_2} / C_{y_2}\ , \qquad (2)$$

где C_{y_1}, C_{y_2} - суммарные боковые жесткости передних и задних колес автомобиля.

Координату центра упругости H находим из следующего выражения:

$$H = \frac{aC_{y_1} - bC_{y_2}}{C_{y_1} + C_{y_2}}. \qquad (3)$$

Собственная частота колебаний автомобиля в плоскости дороги при установившемся прямолинейном движении с учетом (1)–(3):

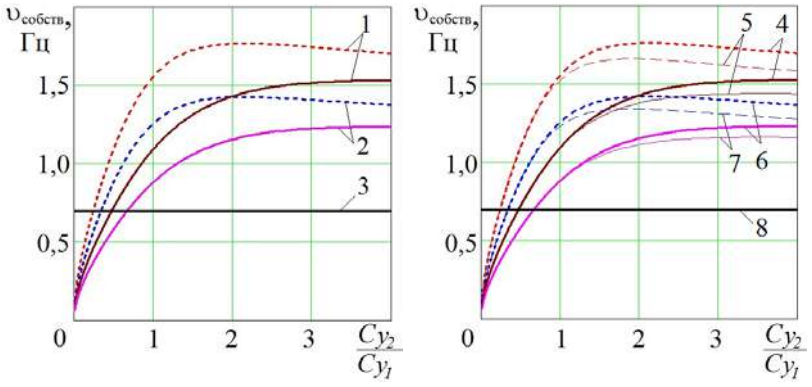
$$\upsilon_{\text{собств}} = \frac{L}{2\pi}\sqrt{\frac{C_{y_1}/m_a}{\left(1+C_{y_1}/C_{y_2}\right)\left[i_Z^2 + a^2\left(\frac{C_{y_1}/C_{y_2} - b/a}{1+C_{y_1}/C_{y_2}}\right)^2\right]}}. \qquad (4)$$

При установившемся повороте выражение (4) примет следующий вид:

$$\upsilon_{\text{собств}} = \frac{L\cdot\cos\overline{\alpha}}{2\pi}\sqrt{\frac{C_{y_1}/m_a}{\left(1+C_{y_1}/C_{y_2}\cos^2\overline{\alpha}\right)\left[i_Z^2 + a^2\left(\frac{C_{y_1}/C_{y_2}\cos^2\overline{\alpha} - b/a}{1+C_{y_1}/C_{y_2}\cos^2\overline{\alpha}}\right)^2\right]}}. \qquad (5)$$

На рис. 2 приведены графики зависимостей (4) и (5), построенные для снаряженного и груженого автомобиля Урал-4320 при различных значениях C_{y_1}. На рис. 2 приняты следующие обозначения: 1 – $P_{\text{ш}}$ = 350 кПа (C_{y_1} = 2,264 × 10^5Н/м); 2 – $P_{\text{ш}}$ = 70 кПа (C_{y_1} = 1,475 × 10^5Н/м); 3 и 8 – $\upsilon_{\text{собств}}$ = 0,7 Гц; 4 – $P_{\text{ш}}$ = 350 кПа (C_{y_1} = 2,264 × 10^5Н/м) и $\overline{\alpha}$ = 5°; 5 – $P_{\text{ш}}$ = 350 кПа (C_{y_1} = 2,264 × 10^5 Н/м) и $\overline{\alpha}$ = 20°; 6 – $P_{\text{ш}}$ = 70 кПа (C_{y_1} = 1,475 × 10^5 Н/м) и $\overline{\alpha}$ = 5°; 7 – $P_{\text{ш}}$ = 70 кПа (C_{y_1} = 1,475 × 10^5 Н/м) и $\overline{\alpha}$ = 20°.

Исходные расчетные параметры автомобиля Урал-4320 приведены в табл. 1.



а) **б)**

Рис. 2. Зависимость частоты собственных колебаний автомобиля Урал-4320 в плоскости дороги от отношения C_{y_2}/C_{y_1}:
а) при прямолинейном установившемся движении;
б) при установившемся повороте;
—— полностью груженый автомобиль, – – – снаряженный автомобиль.

Таблица 1.

Геометрические параметры автомобиля Урал-4320 [3].

Состояние автомобиля	m_a, кг	a, м	b, м	L, м	B, м
Снаряженный	8100	2,39	1,81	4,2	2,0
Полностью груженый	13025	2,97	1,23	4,2	2,0

Определение частоты собственных колебаний машинно-тракторного агрегата при выполнении транспортных операций. В табл. 2 приведены параметры машинно-тракторного агрегата, а на рис. 3 – схема данного агрегата для определения частоты собственных колебаний.

Таблица 2.

Параметры машинно-тракторного агрегата.

$m_{\text{т}}$, кг	$m_{\text{агр}}$, кг	a, м	b, м	L, м	B, м
8260	800	1,697	1,163	2,860	1,860

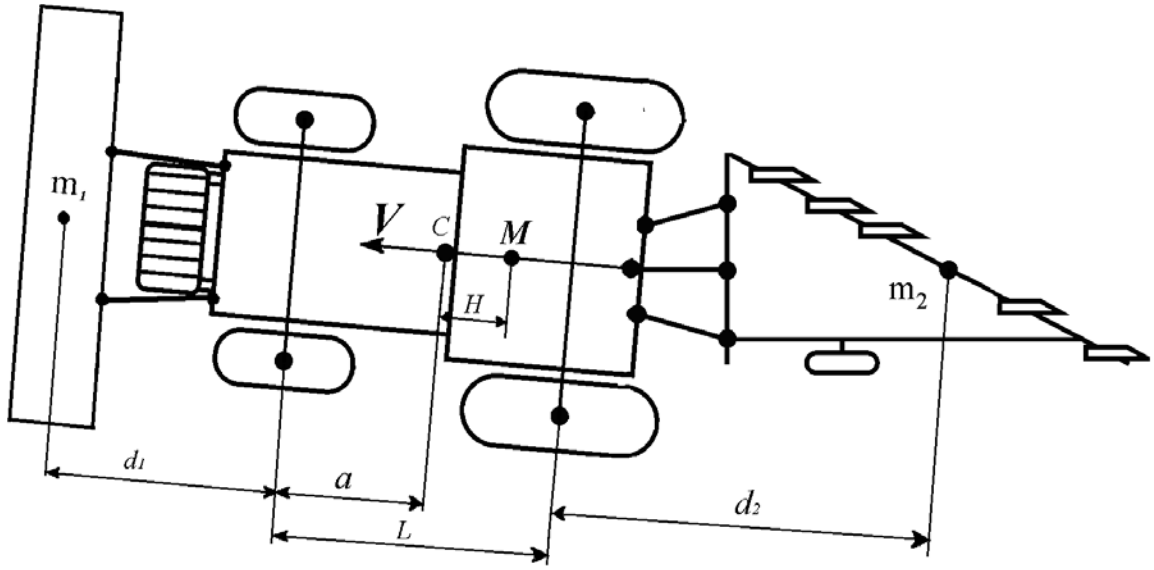


Рис. 3. Схема машинно-тракторного агрегата для определения частоты собственных колебаний.

Момент инерции колесной машины в плоскости дороги, приведенный к вертикальной оси, проходящей через точку *M*:

$$I'_{ZM} = m_a\left(i_Z^2 + H^2\right) + m_1\left(d_1 + a + H\right)^2 + m_2\left(d_2 + L - a - H\right)^2. \qquad (6)$$

Частота собственных колебаний машинно-тракторного агрегата согласно рис. 3 определяется следующим образом:

$$\upsilon_{\text{собств}} = \frac{L}{2\pi}\sqrt{\frac{C_{y1}/m_a}{\left(1+C_{y_1}/C_{y_2}\right)\left[i_Z^2 + a^2\left(\frac{C_{y_1}/C_{y_2} - \frac{b}{a}}{1+C_{y_1}/C_{y_2}}\right)^2\right] + \frac{m_1}{m_2}\left(d_1+a+H\right)^2 + \frac{m_2}{m_1}\left(d_2+L-a-H\right)^2}}. \qquad (7)$$

На рис. 4 приведена зависимость частоты собственных колебаний машинно-тракторного агрегата в плоскости дороги от отношения C_{y_2}/C_{y_1}.

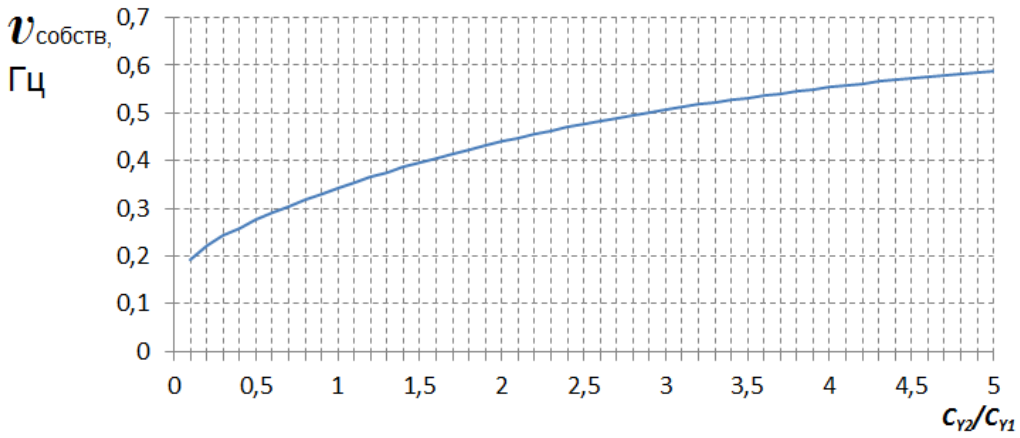


Рис. 4. Зависимость частоты собственных колебаний машинно-тракторного агрегата в плоскости дороги от отношения C_{y_2}/C_{y_1}.

Анализ рис. 4 показывает, что частоты собственных колебаний машинно-тракторного агрегата в плоскости дороги принимают значения меньше 0,7 Гц. При C_{y_2}/C_{y_1} = 1 $\upsilon_{\text{собств}}$ = 0,33 Гц.

Выводы. Полученные зависимости позволяют определять соотношения суммарных боковых жесткостей передних и задних колес автомобиля, при которых частота собственных колебаний исследуемого автомобиля в плоскости дороги будет соответствовать верхнему пределу способности человека производить поворот при маневрах с двойным переходом с одной полосы на другую.

Оптимальными значениями, с точки зрения обеспечения управляемости и устойчивости, снаряженного автомобиля Урал-4320 при установившемся движении являются значения $C_{y_1} = C_{y_2} = 4{,}584 \times 10^4$ Н/м. Для полностью груженого исследуемого автомобиля оптимальными значениями являются $C_{y_1} = C_{y_2} = 9{,}293 \times 10^4$ Н/м.

Если выбором значений суммарных боковых жесткостей передних и задних колес автомобиля достичь $\upsilon_{\text{возм}}^{\max} \geq 0{,}7$ не удается, рекомендуется применение системы динамической стабилизации курсового угла и радиуса поворота автомобиля.

ЛИТЕРАТУРА

1. Forkenbrock G. J. An Assessment of Human Driver Steering Capability, NHTSA Technical Report, DOT HS 809875, October 2005 [Электронный ресурс] / Garrick J. Forkenbrock, Devin Elsasser. – Режим доступа : http://www-nrd.nhtsa.dot.qov/vrtc/ca/capubs/HTSA_forkenbrock_driversteeringcapabilityrpt.pdf.
2. Электронные системы контроля устойчивости: ECE/TRANS/180/Add.8 – [Введены в Глобальный регистр. 2008-06-26]. – Женева : Организация объединённых наций, 2008. – 116 с.
3. Подригало М. А. Управляемость колесных машин при установившемся движении / М. А. Подригало, Д. М. Клец, В. И. Гацько // Автомобильный транспорт : сборник научных трудов. – Харьков : ХНАДУ, 2011. – Вып. 29. – С. 117–125.

УДК 621.074

Падерин В. Н., Абдулгазис У. А.

ПУТИ СОВЕРШЕНСТВОВАНИЯ ТЕХНОЛОГИИ ЛИТЬЯ ПОД ДАВЛЕНИЕМ ТЯЖЕЛЫХ КРУПНОГАБАРИТНЫХ ДЕТАЛЕЙ ИЗ АЛЮМИНИЕВЫХ СПЛАВОВ НА ПРИМЕРЕ БЛОКОВ ЦИЛИНДРОВ

Аннотация. *В статье рассмотрены пути совершенствования технологии изготовления различных тяжелых крупногабаритных деталей на примере автомобильных блоков цилиндров литьем под давлением из алюминиевых сплавов. Из анализа технологических процессов лучших в мире холоднокамерных горизонтальных машин для литья под давлением известных компаний для литья блоков цилиндров, головок блоков, корпусов коробок скоростей и других тяжелых крупногабаритных деталей предлагается путь совершенствования технологии литья с помощью устройства для ввода и вывода в форму блока смазочных форсунок.*

Ключевые слова: *литье под давлением, крупногабаритные тяжелые отливки, блоки цилиндров, наклоняемые плавильные печи, заливка расплава, технология изготовления, автоматизация, пресс-формы, пресс-поршни, смазка формообразующих, алюминиевый сплав, машины ЛПД.*

Падерін В. М., Абдулгазіс У. А.

ШЛЯХИ ВДОСКОНАЛЕННЯ ТЕХНОЛОГІЇ ЛИТТЯ ПІД ТИСКОМ ВАЖКИХ ВЕЛИКОГАБАРИТНИХ ДЕТАЛЕЙ ІЗ АЛЮМІНІЄВИХ СПЛАВІВ НА ПРИКЛАДІ БЛОКІВ ЦИЛІНДРІВ

Анотація. *У статті розглянуто шляхи вдосконалення технології виготовлення різних важких великогабаритних деталей на прикладі автомобільних блоків циліндрів литтям під тиском із алюмінієвих сплавів. Із аналізу технологічних процесів найкращих у світі холоднокамерних горизонтальних машин для лиття під тиском відомих компаній для лиття блоків циліндрів, головок блоків, корпусів коробок швидкостей та інших важких великогабаритних деталей пропонується шлях удосконалення технології лиття за допомогою пристрою для введення й виведення у форму блоку мастильних форсунок.*

Ключові слова: *лиття під тиском, великогабаритні важкі виливки, блоки циліндрів, плавильні печі, що нахиляються, заливка розплаву, технологія виготовлення, автоматизація, прес-форми, прес-поршні, мастило формотворчих, алюмінієвий сплав, машини ЛПД.*

Paderin V. N., Abdulgazis U. A.

WAYS TO IMPROVE DIE-CASTING TECHNOLOGY OF HEAVY LARGE PARTS OF ALUMINUM ALLOYS THROUGH THE EXAMPLE OF CYLINDERS

Summary. *The article deals with the ways to improve the technology of various heavy bulky items production through the example of automotive engine blocks by die-cast aluminum alloy. Basing on the analysis of technological processes in the world-best cold tube-type horizontal machines for die-casting of famous*

companies for casting engine blocks, cylinder heads, blocks, gear box casings and other heavy bulky items the authors offer a way of improving the technology of casting with a device for input and output in the form of block lubricating nozzles.

The recommended ways to improve the technology of casting heavy large parts with a simple device for input and output unit casts that do not have the need for expensive compressor, thus reducing the cost of castings and hard work to facilitate the caster are proposed.

Key words: *die-casting, large heavy castings, cylinder blocks, tilting furnaces, pouring the melt, manufacturing technology, automation, mold, press piston, lubrication shaping, aluminum alloy, machine die-casting.*

Постановка проблемы. Литье под давлением (ЛПД) из-за большой потребности в различных по конструкции тяжелых крупногабаритных деталях, особенно таких, как автомобильные блоки цилиндров (в дальнейшем блоки), головки блоков, корпуса коробок скоростей и других деталей в машиностроении весом до 95 кг, является сложной проблемой на производстве и требует постоянного усовершенствования существующей технологии путем максимальной автоматизации производства, повышения эффективности и качества их изготовления.

При этом необходимо совершенствовать и автоматизировать не только отдельные операции сложной литейной технологии, но и весь цикл изготовления от качественной плавки алюминиевых сплавов и его заливки в камеру прессования до смазки формообразующих поверхностей пресс-форм и пресс-поршней, извлечения из машины отливок.

Анализ публикаций показывает, что в литературе имеются ограниченные данные о путях совершенствования технологии изготовления тяжелых крупногабаритных отливок и дальнейшей автоматизации трудоемких литейных операций [1; 2].

В связи с этим **целью** данной **работы** является поиск новых путей совершенствования технологии изготовления тяжелых крупногабаритных отливок и максимальной автоматизации трудоемких литейных операций на примере автомобильных блоков.

Изложение основного материала. ЛПД автомобильных блоков и других тяжелых крупногабаритных деталей из алюминиевых сплавов – это малоотходный, высокопроизводительный, широко распространенный процесс получения точных отливок, сложной конфигурации с качественной поверхностью, но все это требует постоянного совершенствования существующей литейной технологии.

Сущность процесса ЛПД на горизонтальных холоднокамерных машинах [1] заключается в том, что в металлические пресс-формы под большим давлением (до 700 МПа) запрессовывают алюминиевый сплав, находящийся в жидком состоянии. Затем отливки выдерживают в пресс-форме 10–20 с и больше, в зависимости от массы и толщины стенок, и быстро выталкивают из нее, чтобы не образовались трещины, связанные с торможением усадки сплава частями пресс-формы и стержнями.

При таком процессе отливки получаются с плотным поверхностным слоем толщиной до 0,2–0,4 мм, относительно мелкозернистой структурой, высокими механическими свойствами. Однако внутреннее сечение алюминиевых отливок поражено мелкими пустотами воздушно-газового и усадочного характера и неметаллическими включениями в виде оксидов, карбидов и нитридов алюминия, почти не влияющих на прочность и незначительно влияющих на герметичность отливок. Литье блоков с закладными гильзами устраняет этот дефект.

Кроме того, высокое давление прессования обеспечивает получение самой высокой чистоты поверхности R_a (до 1,6–0,8 мкм) из всех способов литья. При этом чистота формообразующих поверхностей матриц пресс-формы должна быть на два класса выше и составлять R_a 0,4–0,2 мкм.

И наконец, ЛПД обеспечивает высокую производительность и автоматизацию производства наряду с низкой трудоемкостью при изготовлении отливок.

При литье под давлением тяжелых крупногабаритных деталей из алюминиевых сплавов, в том числе и блоков цилиндров, необходимо учитывать основные параметры, влияющие на процесс заполнения и формирования отливки [1; 2]: давление на металл во время заполнения и подпрессовки, скорость прессования, режимы заполнения и смазки формообразующих поверхностей и пресс-поршней, конструкцию литниково-вентиляцион-ной системы, температуру заливаемого сплава и пресс-формы и т. д. Сочетанием и варьированием этих основных параметров добиваются снижения негативных влияний при процессе ЛПД.

Кроме того, существуют определенные традиционные конструкторско-технологические решения по снижению брака: регулирование температуры заливаемого сплава и пресс-формы, повышение давления на металл во время заполнения и подпрессовки, качественное рафиниро-

вание и очистка сплава, конструирование литниково-вентиляционной системы и др.

Изготовление сложных по конструкции в двигателе литых автомобильных блоков в уникальных литейных пресс-формах с мощными гидравлическими системами удаления боковых вставок и других тяжелых крупногабаритных деталей из алюминиевых сплавов является сложной задачей, технологию которой необходимо постоянно совершенствовать.

Рассмотрим литье тяжелых крупногабаритных деталей из алюминиевых сплавов на примере самых сложных автомобильных отливок блоков цилиндров, показанных на рис. 1.

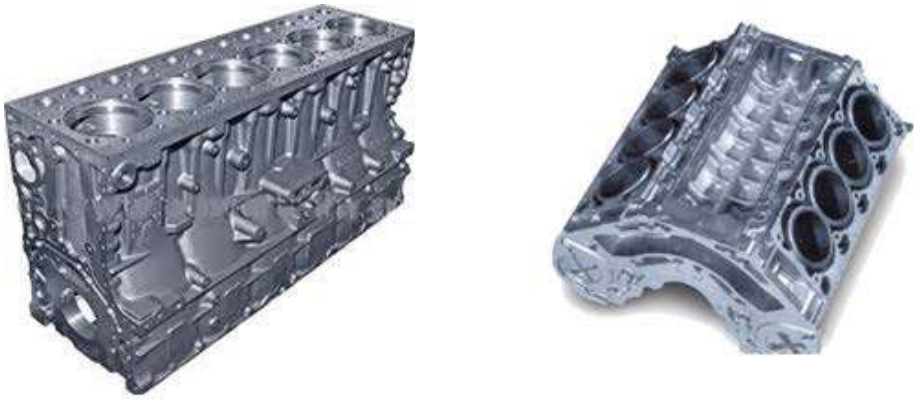


Рис. 1. Наиболее распространенные 6-цилиндровые рядные и 8-цилиндровые V-образные блоки.

Также в качестве примера на рис. 2 показана типовая схема ЛПД простой отливки на машинах с холодной горизонтальной камерой прессования, технология которой аналогична литью блоков и других тяжелых крупногабаритных деталей из алюминиевых сплавов.

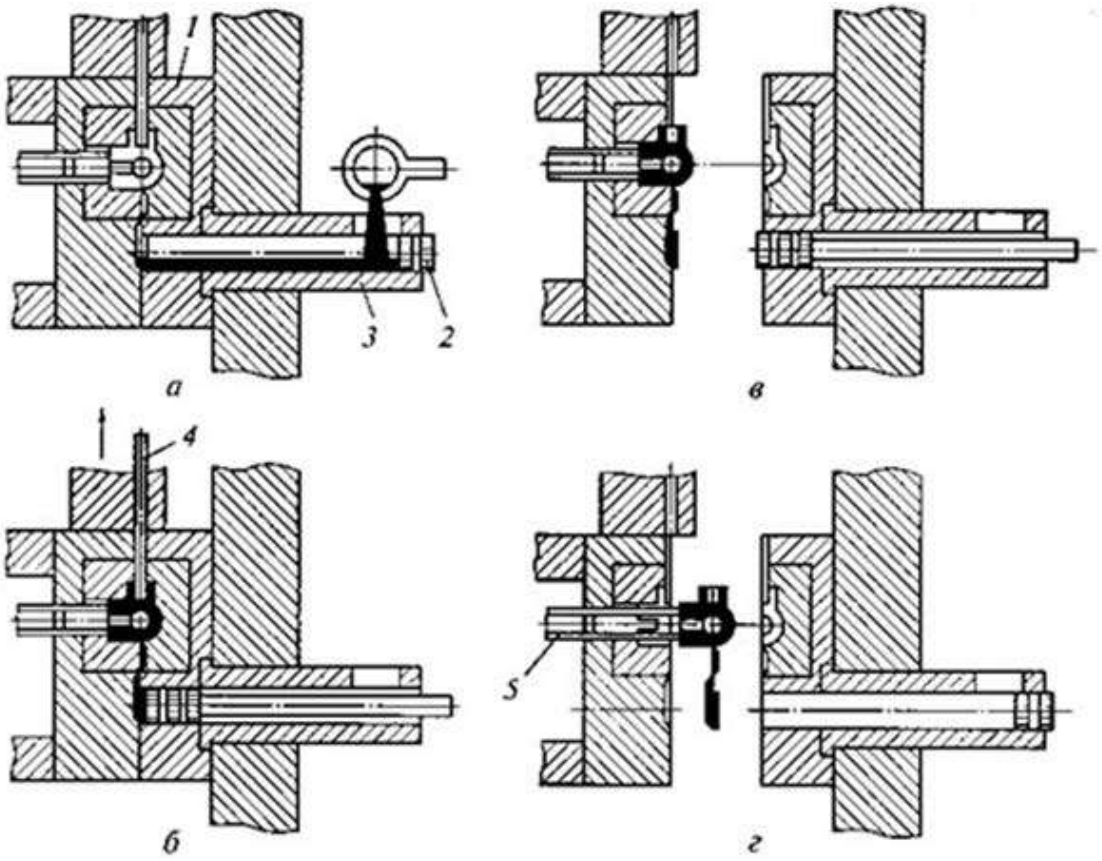


Рис. 2. Схема горизонтальной холоднокамерной машины:
а – заливка расплавленного металла в камеру прессования (1 – плита матриц,
2 – прессующий поршень, 3 – камера прессования);
б – запрессовка расплава в матрицы пресс-формы (4 – знаки, оформляющие боковые отверстия);
в – раскрытие пресс-формы; г – выталкивание отливки (5 – толкатели).

Из схемы на рис. 2 видно, что технологический процесс литья под давлением алюминиевых автомобильных блоков и тяжелых крупногабаритных деталей на машинах с холодной горизонтальной камерой прессования осуществляется следующим образом. На литейную машину устанавливается пресс-форма, состоящая из подвижной и неподвижной полуформ. Затем пресс-форму раскрывают, смазывают специальной разделительной смазкой, предохраняющей от приваривания расплава к матрицам, и закрывают полуформы. После этого расплав заливают в камеру прессования и запрессовывают его под большим давлением с помощью пресс-поршня, выдерживают до полного затвердевания расплава, раскрывают пресс-форму и с помощью толкателей удаляют отливку вместе с литниковой системой из матриц. Затем отливку удаляют из разъема между полуформами с помощью устройства для удаления отливок и укладывают в тару на поддон или на конвейер. После этого цикл литья повторяется снова.

Для ЛПД автомобильных блоков и других крупногабаритных отливок с весом до 95 кг изготавлено несколько уникальных машин итальянской литейной компании Italpresse и российской фирмы «Сиблитмаш».

На рис. 3 показана одна из лучших в мире холоднокамерная горизонтальная машина для ЛПД компании Italpresse с 3-фазным узлом прессования модели IP 4000 SC для литья блоков цилиндров, головок блоков, корпусов коробок скоростей и других тяжелых крупногабаритных деталей весом до 95 килограмм.

Рис. 3. Специальная машина компании Italpresse модели IP 4000 SC [3] для ЛПД корпусов 4- и 6-цилиндровых рядных и 8-цилиндровых V-образных блоков из алюминиевых сплавов.

На рис. 4 показана еще одна холоднокамерная горизонтальная машина для ЛПД компании Italpresse, самая современная, принципиально новой конструкции, модели TF 3700 SC для литья тяжелых крупногабаритных деталей автомобилей весом до 51,5 кг. По сравнению с аналогом эта новая машина для литья под давлением имеет вместо традиционного, сложного по конструкции, рычажного механизма запирания более простой, но при этом увеличивающий усилие запирания пресс-форм и снижающий габариты машины.

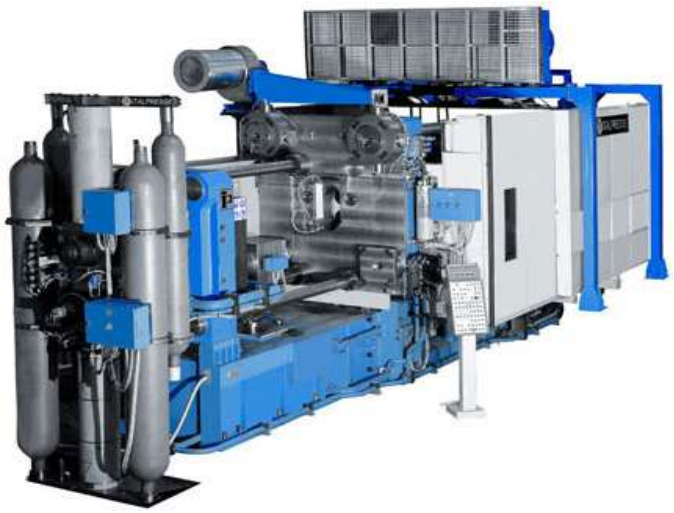


Рис. 4. Новая конструкция машины ЛПД компании Italpresse модели TF 3700 SC.

Основные характеристики холоднокамерных горизонтальных машин для ЛПД с 3-фазным узлом прессования «SC» моделей TF 3700 и IP 4000.

	TF 3700	**IP 4000**
Усилие запирания пресс-формы, кН	36300	40220
Усилие поддержания запирания, кН	39930	44240
Усилие прессования, кН	2800/2430	2800/2540
Усилие выталкивателей, кН	978	978
Наименьшая высота формы, мм	750	900
Наибольшая высота формы, мм	1650	2300
Прижимные плиты, мм	2230×2330	2900×2900
Расстояние между колоннами, мм	1430×1430	1850×1850
Диаметр колонн, мм	300	370
Ход подвижной плиты, мм	1500	1900
Ход выталкивателей, мм	300	400
Наибольший вес отливки, кг	51,5	95,0
Габаритные размеры, мм:		
длина	14150	18100
ширина	4450	5300
высота	4650	5300
Вес литейной машины, тонн	175	310

Кроме зарубежных машин для литья блоков автомобилей и других тяжелых крупногабаритных деталей используются машины ЛПД нового поколения российской фирмы «Сиблитмаш». В настоящее время «Сиблитмаш» выпускает 12 типоразмеров машин нового поколения с усилием запирания от 1000 до 35000 кН.

На рис. 5 изображена уникальная пресс-форма для ЛПД 4-цилиндрового рядного блока из алюминиевого сплава, состоящая из подвижной и неподвижной полуформ, а на рис. 6 – корпус блока, изготовленного в пресс-форме, показанной на рис. 5.

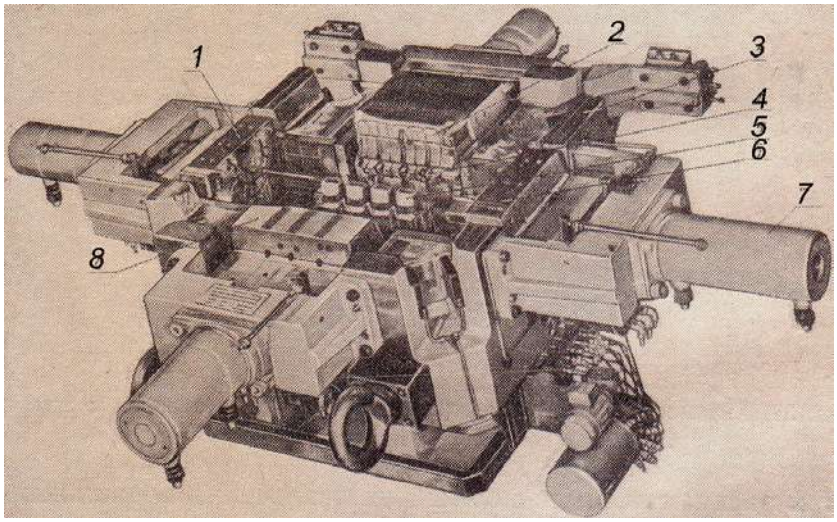


Рис. 5. Подвижная половина пресс-формы для ЛПД 4-цилиндрового рядного блока.

Рис. 6. Корпус 4-цилиндрового рядного блока.

Рассмотрим конструкцию сложной, специальной пресс-формы для ЛПД 4-цилиндрового блока, показанной на рис. 5.

Отливка блока оформляется вкладышами и вставками 5, смонтированными в обоймах 3, а также подвижными щеками 1, 2, 6, 8. Свыше ста отверстий в отливке оформляются неподвижными и подвижными стержнями 4. Камера прессования смонтирована в неподвижной полуформе. При раскрытии пресс-формы для извлечения подвижных щек и освобождения отливки применяют гидравлические приводы 7, работа которых

регулируется распределителем, включенным в общую гидравлическую систему машины.

Для обеспечения заданного температурного режима в подвижной и неподвижной частях пресс-формы, а также во вставках установлены контрольные термопары и регуляторы. Система охлаждения – водяная.

На рис. 7 показана установка на машину ЛПД пресс-формы 4-цилиндрового блока с помощью кран-балки. Если из-за больших размеров пресс-форму установить невозможно, то отодвигают одну или две верхние колонны машины, как показано на рис. 7 сверху.

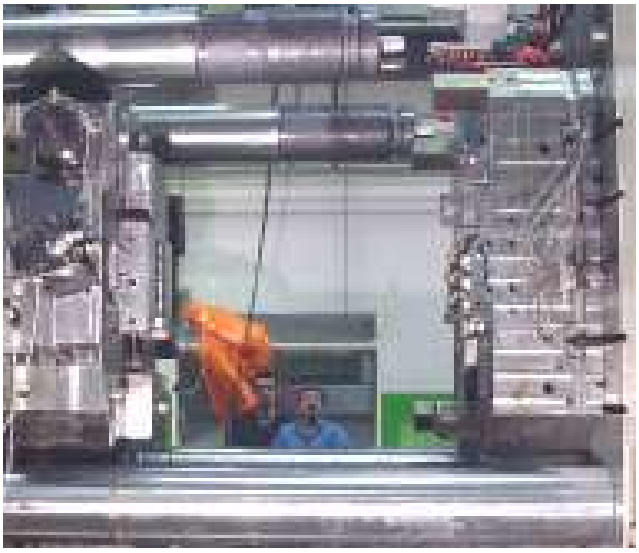


Рис. 7. Установка пресс-формы на машину с помощью кран-балки.

Учитывая, что кран-балка для установки пресс-форм на машину уже имеется, то её рекомендуется использовать дополнительно вместо сложного дорогостоящего робота для удаления тяжелых отливок блоков. Для этого необходимо модернизировать кран-балку для установки пресс-форм на машину, сделав дополнительный специальный захват для удаления тяжелых отливок из машины и укладки их на поддон или конвейер для отправки на склад, где они должны пройти естественное старение в течение 12–15 дней до момента, когда их начнут механически обрабатывать. Кроме того, управление кран-балкой необходимо вывести на пульт литейной машины. Это позволит снизить затраты на приобретение робота.

Рассмотрим еще несколько путей совершенствования технологии изготовления тяжелых крупногабаритных отливок.

Другим путем совершенствования технологии литья блоков и тяжелых отливок до 95 кг является установка вместо раздаточной печи наклоняемой индукционной плавильной печи для плавки алюминиевых сплавов ёмкостью 1 тонна и более. Непосредственно сзади машины ЛПД, напротив заливочного окна камеры прессования, через желоб, наклоняя печь, заливают необходимую дозу расплавленного алюминиевого сплава сразу в камеру прессования. Это позволяет не применять раздаточную печь большой ёмкости и сложные заливочные устройства. При этом необходимо в камере прессования установить датчик, сигнализирующий автоматически о величине заливаемой дозы или выполнить визуальную отметку с целью заливки постоянной дозы расплава. На рис. 8 показана наклоняемая печь емкостью 1 тонна индукционного типа, с помощью которой можно через специальный дополнительный желоб непосредственно заливать расплав в заливочное окно камеры прессования.

Рис. 8. Общий вид наклоняемой индукционной печи емкостью 1 тонна.

Для того чтобы не приваривался расплавленный алюминиевый сплав к формообразующим поверхностям матриц и пресс-поршню, необходимо применять специальные смазки, предотвращающие задиры на поверхностях отливок и уменьшающие усилия выталкивания их из пресс-формы. Для выполнения обязательной технологической операции смазки применяются дорогостоящие роботы с блоком форсунок для одновременной смазки подвижной и неподвижной полуформ и компрессора к ним для создания сжатого воздуха.

Из-за большой площади смазки (до 6 м^2) для крупногабаритных отливок смазка вручную, из пульверизатора, не представляется возможным. В этом случае для совершенствования технологии ЛПД, автоматизации операции смазки формообразующих поверхностей пресс-форм и снижения затрат за счет неиспользования дорогих смазочных роботов и компрессорных станций рекомендуется применение простых смазочных устройств, состоящих из блока форсунок и пневмоцилиндра для их ввода и вывода из пресс-формы. При этом вместо дорогого компрессора

рекомендуется применение стандартного пневмоцилиндра расчетного диаметра, установленного между подвижной и неподвижной плитами сзади машины. При раскрытии полуформ в пневмоцилиндре создается давление до 1 Мпа и более, а затем после удаления отливки с его помощью через редукционный клапан, настроенный на необходимое давление, например 0,4–0,5 Мпа, но достаточное для ввода и вывода пневмоцилиндром блока форсунок и смазки формообразующих пресс-форм. При этом управление потоками сжатого воздуха осуществляется через пневмораспределители с пульта машины. При смыкании плит машины воздух стравливается, а при размыкании плит вновь создается, и цикл смазки повторяется. Емкость для смазочного состава устанавливается сзади, на неподвижной плите выше форсунок и пресс-поршня, чтобы смазка поступала самотеком.

На рис. 9 показано предлагаемое авторами простое устройство, содержащее стандартный недорогой пневмоцилиндр для ввода и вывода блока форсунок, устанавливаемое на неподвижной плите машины сзади горизонтально, так как удаление отливок из машины осуществляется кран-балкой сверху машины.

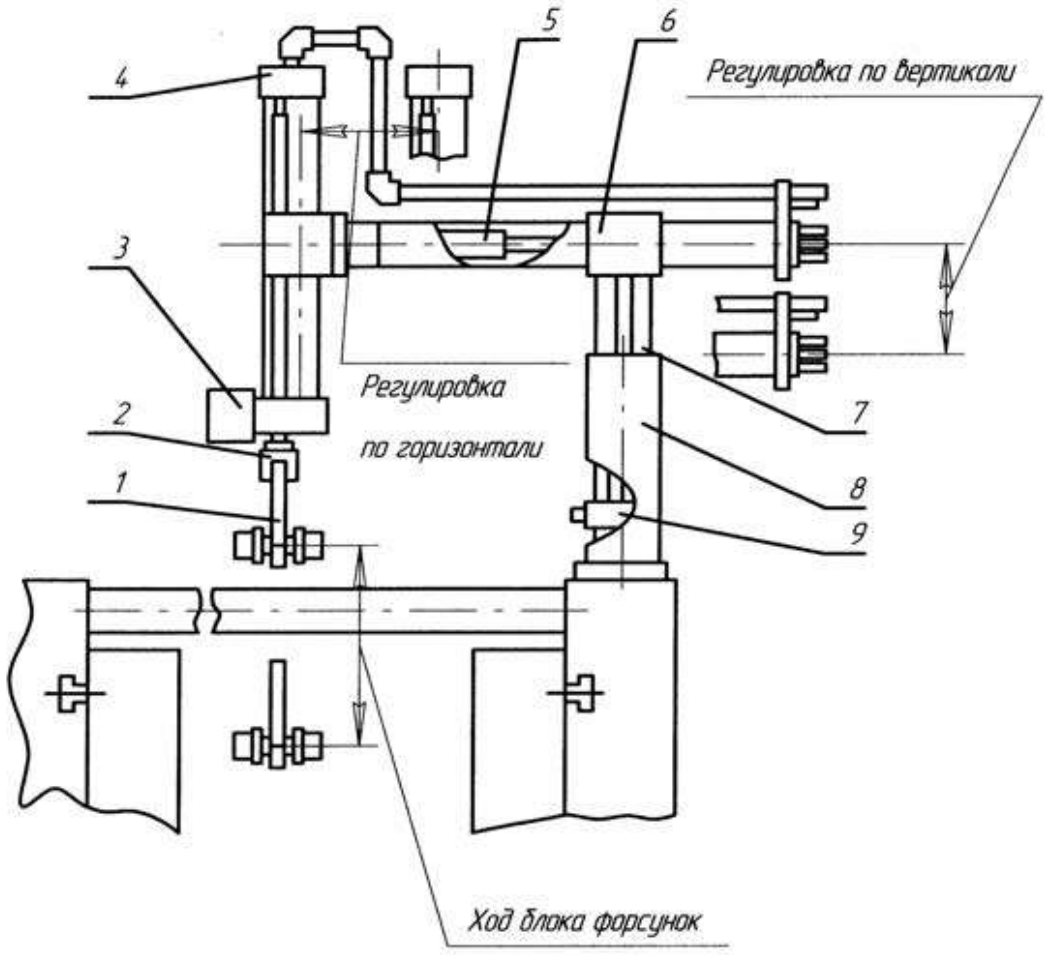


Рис. 9. Устройство для ввода и вывода блока смазочных форсунок:
1 – блок форсунок; 2 – шток пневмоцилиндра; 3 – фиксатор;
4 – крышка пневмоцилиндра, через которую подается сжатый воздух;
5, 6, 7, 8, 9 – механизмы регулировки блока форсунок.

В качестве еще одного пути совершенствования технологии ЛПД предлагается применение устройства для автоматической смазки пресс-поршней в процессе работы машины (рис. 10). Смазка пресс-поршней осуществляется следующим образом. Прессующий шток на машине изготавливается на 3–4 мм меньше по диаметру, чем пресс-поршень, в результате чего, когда он находится над клапанами 33 и 34, пружины 35 и 36 сжимаются и смазка из емкости поступает к пресс-поршню. При этом во время движения пресс-поршня на запрессовку расплава он смазывается, а затем из-за меньшего его диаметра клапаны под действием пружин автоматически закрываются и подача смазки прекращается. Во время возвращения пресс-поршня в исходное положение клапаны 33 и 34 снова поднимаются, и цикл смазки повторяется снова.

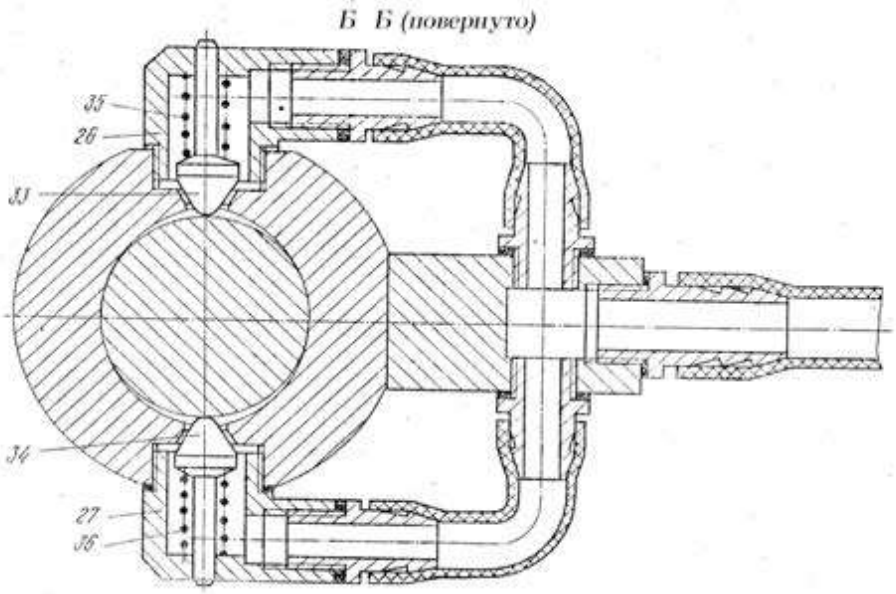


Рис. 10. Устройство для автоматической смазки пресс-поршней.

Выводы. Рекомендуемые пути совершенствования технологии литья тяжелых крупногабаритных отливок с помощью устройства для ввода и вывода блока форсунок, отсутствие необходимости применения дорогостоящего компрессора, применение автоматической смазки пресс-поршней в цикле работы машины, заливка расплава в камеру прессования непосредственно с помощью наклоняемой плавильной печи и применение кран-балки со специальным захватом позволяют снизить стоимость отливок и облегчить тяжелый труд литейщика.

ЛИТЕРАТУРА

1. Падерин В. Н. Литье герметичных деталей пневмоаппаратуры / В. Н. Падерин. – Симферополь : OCAQ, 2008. – 511 с.
2. Падерин В. Н. Технология и оборудование заготовительного производства. Часть 2. Литье под давлением деталей автомобилей : учебное пособие для студентов специальности «Автомобильный транспорт» РВУЗ «КИПУ» / В. Н. Падерин, У. А. Абдулгазис. – Симферополь : ДИАЙПИ, 2014. – 173 с.
3. Паспорт машины литья под давлением компании Italpresse модели IP 4000 SC.

УДК 656.13

Сулейманов Э. С. Абдулгазис А. У., Сулейманов Э. Э.

ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ ПАССАЖИРСКОЙ ТРАНСПОРТНОЙ СИСТЕМЫ г. СИМФЕРОПОЛЯ ПУТЕМ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ТРОЛЛЕЙБУСОВ С ЧАСТИЧНЫМ АВТОНОМНЫМ ХОДОМ

Аннотация. *В статье предложены пути совершенствования системы троллейбусного транспорта г. Симферополя, варианты модернизации троллейбусного парка, а также охарактеризованы преимущества использования асинхронных тяговых двигателей, позволяющих удлинять существующие маршруты за счет автономного хода, а также даны финансово-эксплуатационные сравнительные характеристики различных видов подвижного состава.*

Ключевые слова: *троллейбус с автономным ходом, сетевой ход, литий-ионные аккумуляторные батареи, контактная сеть, асинхронный тяговый двигатель, «Славянка», электробус, рекуперация электроэнергии.*

Сулейманов Е. С. Абдулгазіс А. У., Сулейманов Е. Е.

ПЕРСПЕКТИВИ РОЗВИТКУ ПАСАЖИРСЬКОЇ ТРАНСПОРТНОЇ СИСТЕМИ м. СІМФЕРОПОЛЯ ШЛЯХОМ ВИКОРИСТАННЯ ТРОЛЕЙБУСІВ ІЗ ЧАСТКОВИМ АВТОНОМНИМ ХОДОМ

Анотація. *У статті запропоновано шляхи вдосконалення системи тролейбусного транспорту м. Сімферополя, варіанти модернізації тролейбусного парку, а також охарактеризовано переваги використання асинхронних тягових двигунів, що дозволяють подовжувати існуючі маршрути за рахунок*

автономного ходу, а також подано фінансово-експлуатаційні порівняльні характеристики різних видів транспорту.

Ключові слова: *тролейбус із автономним ходом, мережевий хід, літій-іонні акумуляторні батареї, контактна мережа, асинхронний тяговий двигун, «Слов'янка», електробус, рекуперація електроенергії.*

Suleymanov E. S., Abdulgazis A. U., Suleymanov E. E.

PROSPECTS OF SIMFEROPOL PASSENGER TRANSPORT SYSTEM DEVELOPMENT THROUGH USING TROLLEYS WITH PARTIALLY INDEPENDENT COURSE

Summary. *There are two variants of development of transport trolleybus system on the example of Simferopol. In the first embodiment, it is proposed to replace the rolling stock on modern samples of vehicles capable of traveling modes trolley and electric bus powered by lithium-ion batteries. In the second embodiment, a deep modernization of the obsolete models trolley, to reduce energy consumption and to enable partial independent course for the transport of peripheral neighborhoods is revealed.*

Prospects expected by the implementation of the proposals: the elimination of transport congestion at breakage of wires; extension of trolleybus routes in remote districts without energy supply arrangement wire system; creation of the trolley park upgraded with partial autonomous way and providing infrastructure and operation of future electric vehicles, electric buses.

Key words: *trolley with an autonomous course, network speed, lithium-ion rechargeable batteries, contact network, asynchronous traction motor, «Slavjanka», electric bus, recovery of electricity.*

Постановка проблемы. Частые энергетические кризисы, рост цен на углеводородные источники энергии, сбои в их поставках, более низкий коэффициент полезного действия, снижение запасов углеводородного топлива и проблемы загрязнения воздушной среды являются главными причинами ведения ведущими мировыми флагманами автомобилестроения США, Японии, Германии, Франции, Китая и Кореи интенсивных разработок по созданию транспортных средств массового спроса, работающих на электрической тяге.

Основной задачей при создании электромобилей и электробусов является изготовление мощных и ёмких накопителей энергии и зарядных электростанций. Промежуточным транспортным средством между автобусом и электробусом должен стать троллейбус с частичным автономным ходом, который и при массовом использовании электробусов будет применяться по причине экономической целесообразности, так как всегда будет дешевле электробусов. На первом этапе появления электробусов функции зарядных станций могут выполнять существующие контактно-кабельные линии городского электрического транспорта.

Анализ последних исследований и публикаций. Энергетические затраты автобуса на 1 км пробега в 2,5–3 раза больше, чем у троллейбуса на литий-ионных аккумуляторных батареях (ЛИА), который тратит на 1 км пробега 1,8 кВт·ч с учётом потерь в линиях, или 1,2 кВт·ч по счётчику, установленному на троллейбусе, в то время как на современных троллейбусах расход электроэнергии составляет 2,5 кВт·ч на 1 км пробега [1; 2].

В мире распространены три вида возможных источников автономного энергопитания электромобилей и троллейбусов с частичным автономным ходом: супераккумуляторы, суперконденсаторы и дизельэлектростанции.

1. Электробусы на суперконденсаторах быстро заряжаются и быстро разряжаются. Удаление от зарядной станции возможно в пределах 2–3 км [3].

2. Электробусы на литий-ионных аккумуляторах имеют высокую стоимость (500–700 тыс. долларов). Вес батареи составляет 3,5 т, дальность поездки без подзарядки примерно 150–180 км. Время зарядки большими токами – 1,5–2 часа, что требует развитых мощных электрокабельных линий [4].

3. Электробусы с дизельэлектростанцией не решают проблему экологии и малоэффективны с энергетической точки зрения, так как повышение КПД сжигания дизельного топлива уничтожается потерями за счёт КПД электростанции [5].

Тем не менее, по мнению большинства экспертов, будущее автомобилестроения – за электрическими видами транспорта. С открытием в начале этого века высоких показателей проводимости у железофосфата лития в совокупности с нанотехнологиями нанесения углерода на катод открылись новые перспективы в развитии электромобилестроения [6]. Обладая такими свойствами, как частичный автономный ход и повышенная маневренность, электроподвижной состав может проезжать спецучастки контактной сети (стрелки, пересечения) на большой скорости с опущенными токоприемниками, что, в свою

очередь, позволяет убрать контактную сеть и ее спецучастки с отдельных улиц и площадей.

Цель работы – обосновать перспективы использования троллейбусов с частичным автономным ходом в расширении транспортной системы г. Симферополя.

Изложение основного материала. До конца 2010 года подавляющую часть парка КРПП «Крымтроллейбус» составляли машины «Škoda» 9Tr и 14Tr [7]. Троллейбусы всех остальных моделей поставлялись на предприятие в количестве не более 4–5 машин. Государственное предприятие КРПП «Крымтроллейбус» получило диплом «Книги рекордов Украины» как компания, эксплуатирующая самые старые троллейбусы в Украине. Большинство машин «Škoda» были произведены ещё в 1970-х годах, их средний возраст составлял в 2010 году 25,7 лет при том, что заводом-изготовителем срок службы ограничен 14 годами. Всего на 2010 год в парке числилось 287 троллейбусов, ещё 200 находились в разобранном, не подлежащем восстановлению виде. Изношенность парка составляла 96,8%.

В 2010–2011 годах КРПП «Крымтроллейбус» получил 103 современных троллейбуса «Богдан» (модификации «Богдан» Т701.10 и «Богдан» Т601.11 для города и «Богдан» Т701.15 для междугородних перевозок) производства Луцкого автозавода.

На 2014 год, по информации сайта «Городской электротранспорт» [8], в списочном составе парка находятся 103 современных троллейбуса «Богдан» и 129 старых троллейбусов «Škoda», которые обслуживают 21 маршрут в г. Симферополе, а также Алуштинский и Ялтинский филиалы.

Анализ баланса и отчетов КРПП «Крымтроллейбус» за 2013 год [9] позволил обобщить финансовые результаты за этот период (см. табл. 1 и 2).

Таблица 1.

Распределение поступлений по статьям доходов КРПП «Крымтроллейбус» за 2013 г.

№ п/п	Наименование статьи доходов	Условное обозначение	Сумма, тыс. грн.	Удельный вес, %
1.	Доходы от эксплуатации	Д(э)	42416,6	34,7
2.	Компенсация за льготный проезд	Д(лп)	46024,6	37,6
3.	Дотации по государственному регулированию	Д(гр)	4872	4,0
4.	Доходы от безвозмездно полученных основных средств	Д(бос)	22093,7	18,1
5.	Доходы от неосновной производственной деятельности	Д(нпд)	6900,6	5,6
	Итого:	Д(вал)	122307,5	100

Таблица 2.

Распределение затрат по статьям расходов КРПП «Крымтроллейбус» за 2013 г.

№ п/п	Наименование статьи расходов	Условное обозначение	Сумма, тыс. грн.	Удельный вес, %
1.	Расходы на оплату труда	З(фот)	82635,3	63,0
2.	Расходы электроэнергии на тягу	З(эт)	8910,2	6,8
3.	Амортизационные отчисления на восстановление	А(в)	21433,8	16,3
4.	Налоги и платежи в бюджет	З(нп)	2975,9	2,3
5.	Затраты на ремонт контактной сети и ТО, ТР троллейбусов	З(то.тр)	6993,1	5,3
6.	Прочие хозяйственные и накладные расходы	З(пр)	8258,2	6,3
	Итого:	З(общ)	131206,5	100

Как видно из табл. 1 и 2, общие затраты превышают валовый доход на 8899 тыс. грн. В статьях расходов основными являются затраты на заработную плату 63%, в то время как на других производствах она составляет от 20–40%. Это говорит о низкой производительности труда, содержание большого штата работников и нерациональной организации труда. Необходимо сокращать общий фонд заработной платы предприятия.

За 2013 год КРПП «Крымтроллейбус» было перевезено $П_{пасс}$ = 129788,8 тыс. пассажиров. Общий пробег парка составил $L_{общ}$ = 13674,5 тыс. км. На балансе предприятия состоит среднесписочное количество троллейбусов $Т_{сс}$ = 232 шт., коэффициент выпуска парка составил $\alpha_в$ = 0,7

Для определения структуры себестоимости определим финансовые затраты на перевозку 1 пассажира и на пробег в 1 км, в том числе составляющую по расходам на электротягу [10].

$$S_{пас} = \frac{З_{общ}}{П_{пасс}} = \frac{131206,5}{129788,8} = 1,011 \text{ грн./пасс.} \quad (1)$$

$$S_{км} = \frac{З_{общ}}{L_{общ}} = \frac{131206,5}{13674,5} = 9,6 \text{ грн./км} \quad (2)$$

$$S_{эт} = \frac{З_{эт}}{L_{общ}} = \frac{8910,2}{13674,5} = 0,65 \text{ грн./км (по электротяге)} \quad (3)$$

Для вычисления среднесуточного пробега одного троллейбуса $L_{с.сут}$ вначале определим их эксплуатационное количество на протяжении года $Д_{рг}$ = 365 дней. С учетом коэффициента выпуска ежедневно в эксплуатации находятся 163 троллейбуса, среднесуточный пробег которых составляет 230 км. На основе полученных данных суточные затраты по эксплуатации троллейбуса составляют 2208 грн., а затраты электроэнергии на тягу – 150 грн.

Варианты развития транспортной троллейбусной системы г. Симферополя.

Вариант 1. Смена подвижного состава на современные образцы транспортных средств, способные передвигаться в режимах троллейбуса и электробуса с питанием от батареи литий-ионных аккумуляторов [1].

Пробег опытных образцов в режиме электробуса составляет 30–50 км при снаряжённой массе и 20–40 км при полной массе троллейбуса. После пробега в режиме электробуса троллейбус, двигаясь под контактной сетью, производит подзарядку аккумуляторов. При торможении в режиме троллейбуса и электробуса кинетическая энергия превращается в электрическую и идёт на подзарядку аккумуляторов.

Большой частичный автономный ход троллейбуса обеспечивается установкой под полом батареи ЛИА, состоящей из 168 аккумуляторов. Ёмкость аккумуляторов – 90 А·час. Вес комплекта батареи колеблется от 480 до 1000 кг. Цена комплекта аккумуляторов – 229–300 тыс. грн. (870–1000 тыс. рублей). Ориентировочная цена такого троллейбуса, например, СТ-6217 с энергетической установкой производства ОАО «Сибэлтранссервис», составляет 1,975–2 млн. грн. (7,5–8 млн. руб.) [2].

Срок службы аккумуляторов зависит от количества циклов, а количество циклов – от степени разрядов во время циклов. При условиях эксплуатации, когда разряд аккумуляторов достигает до 60% (возможное отклонение от контактной сети на 15 км), срок службы составляет 8000–10000 циклов, или 7 лет из расчёта протяжённости оборотного рейса $l_{об}$ = 30–40 км (в том числе 15 км без контактной сети) при средней продолжительности смены $t_{см}$ = 12 часов и скорости сообщения $v_{с}$ = 16–20 км/ч, количество зарядки за день составит 5 циклов.

Указанные расчёты произведены для полной массы троллейбуса в период срока службы ЛИА, то есть реальные условия эксплуатации значительно легче. Все эксплуатационные показатели могут быть увеличены за счёт выбора более ёмких аккумуляторов, но это приведёт к удорожанию транспортного средства.

Важно отметить и то, что изготовленный опытный образец троллейбуса СТ-6217 имеет наиболее оптимальные показатели веса и стоимости за 1 т · км пробега транспортного средства.

Вариант 2. Глубокая модернизация парка устаревших троллейбусов моделей Škoda-9Tr и Škoda-14Tr КРПП «Крымтроллейбус» с целью снижения потребления электроэнергии и обеспечения возможности частичного автономного хода для транспортного обслуживания периферийных микрорайонов г. Симферополя.

По этой программе достигнута договоренность с компанией ООО «КОМТРАНС» (Россия) [11], занимающейся разработкой и производством модельных типов пассажирского, легкового и грузового электроавтотранспорта, о внедрении её продукции и научно-технических разработок в Крыму. Участниками этой программы выступают Крымская Академия Наук, Правительство Крыма, КРПП «Крымтроллейбус», КП СГС «СевЭлектроАвтоТранс». Суть её заключается в следующем.

Этап 1. Реконструкция старой модели троллейбусов Škoda-9Tr и Škoda-14Tr (остаточная стоимость которых составляет 15–25 тыс. грн.) с заменой двигателя постоянного тока на асинхронный с совмещенной обмоткой («Славянка») в комплекте с преобразователем дает преимущества перед традиционным асинхронным двигателем: пусковой момент выше на 20–100%, пусковые токи ниже на 20–50%; кратность максимального момента до пяти-семи по отношению к номинальному; КПД преобразования электроэнергии в механическую работу достигает 95% с сохранением этого значения в диапазоне нагрузок 25–120%; перегрузочная способность значительно выше; снижение потребления электроэнергии на 30%; меньший нагрев двигателя на форсированных режимах.

Этап 2. Модернизация троллейбусов Škoda-9Tr и Škoda-14Tr в варианте возможности автономного хода 20–30 км с комплектацией блоком ЛИА и рекуперацией электроэнергии при смене режимов движения позволяет возвращать в контактную сеть до 20% электроэнергии.

Общая стоимость работ на комплекс оборудования для одного троллейбуса, транспортировки оборудования, контрольные стендовые и маршрутные испытания, запуск в коммерческую эксплуатацию составит 1250 тыс. грн.

Перспективы:

а) исключение заторов транспорта при обрыве проводов, аварийных ситуациях и т. д.;

б) продление троллейбусных маршрутов в районы улиц Героев Сталинграда, Маршала Жукова, Леси Украинки, в микрорайоны Агроуниверситет, Чистенькое, Хошкельды и др. без устройства высокозатратной энергопитающей проводной системы;

в) создание парка модернизированных троллейбусов Škoda-9Tr и Škoda-14Tr с автономных ходом как элемент реставрации историко-рекреационного и туристического имиджа Симферополя, трассы Симферополь-Ялта, ЮБК.

Этап 3. Диверсификация существующего пассажирского транспорта с ДВС на модельный ряд электробусов различной вместимости на основе ЛИА. Разработка, производство и внедрение электрозарядных систем для коммунального, коммерческого и индивидуального электротранспорта.

Преимущества:

- резкое снижение выбросов токсичных газов и теплоты в окружающую среду, что весьма важно для городов и курортно-санаторных комплексов Крыма;
- значительное (в 2,3–2,4 раза) снижение энергетических затрат вследствие более высокого КПД преобразования электрической энергии в механическую работу (0,9–0,95) в сравнении с КПД традиционных ДВС (0,35–0,4);
- значительное снижение эксплуатационных расходов (в 4 раза) ввиду более низкой стоимости электроэнергии адекватной мощности при ночном режиме зарядки.

При этом дополнительно исключаются затраты на смазочные материалы и техобслуживание, упрощается конструкция автомобиля. По мере неуклонного удорожания сырьевых углеводородов преимущество электробусов будет возрастать.

Перспективы развития городской электротранспортной сети г. Симферополя.

1. Развитие троллейбусной сети с ЛИА на базе Škoda-9Tr мы предлагаем начать с одного пилотного маршрута, например, «Агроуниверситет-Маршала Жукова», общая длина которого составляет 20 км, включая плечи автономного хода (Агроуниверситет-Московское кольцо – 6,7 км и ул. Аэрофлотская-М. Жукова – 5,8 км).

При сложившейся скорости транспортного потока в г. Симферополе 20 км/ч время оборотного рейса будет составлять 2 часа. Для соблюдения интервала 10–12 мин. необходимое эксплуатационное количество троллейбусов составит 10–12 шт.

2. На втором этапе предлагается продление 11-ти маршрутов, итоговая оборотная протяженность которых составляет ≈ 330 км, сетевого хода – ≈ 249 км (75,5%), автономного хода – ≈ 81,0 км (24,5%). При условной средней скорости троллейбуса по маршруту 20 км/час и усредненном интервале движения 10 мин. итоговый парк машин составит 100–130 шт.

Для сравнения, на сооружение аналогичной по объёму троллейбусной контактной сети автономного хода с соответствующей инфраструктурой потребуется по современным ценам 300 млн. грн. и 10–15 лет на их строительство. Сэкономленные средства можно направить на обновление троллейбусного парка машинами с самым современным энергоэффективным электроприводом и возможностью автономного хода.

Экономическая эффективность.

В настоящий момент троллейбусы могут рекуперировать энергию в сеть, превращая кинетическую энергию движения в электрическую [2]. Однако потребление этой энергии возможно только при временном совпадении процесса потребления энергии другим троллейбусом, находящимся на данном участке контактной сети (фидере). Практическая экономия в расчётах с применением вероятностных методик оценивается в 15–20% от всей рекуперированной энергии. В троллейбусах с реостатно-контакторными системами управления рекуперирование энергии в сеть вообще невозможно, и при гашении кинетической энергии троллейбуса, приобретённой им при разгоне, генерируемые двигателем токи гасятся на тормозных сопротивлениях и превращаются в тепло. Тормозные токи в существующих моделях троллейбусов составляют от 0 до 200 А. Учитывая, что троллейбус с ЛИА потребляет ток 45 А, можно сказать, что находящийся в единственном числе на фидере троллейбус с ЛИА сэкономит 5–6% потреблённой самим на разгон электроэнергии. В случае отсутствия негативного воздействия на катоды пиковых зарядных токов или нахождения на фидере 5–6 троллейбусов эта экономия может быть доведена до 25–30%.

Экономия энергоресурсов осуществляется за счёт замены части автобусов на троллейбусы с большим автономным ходом. Замена автобуса, имеющего на 50–60% общую трассу с троллейбусной маршрутной сетью, на троллейбус позволит снизить себестоимость перевозки пассажиров, сэкономить электроэнергию путём использования рекуперированной энергии при торможении, снизить эксплуатационные затраты на ТО и ТР.

Только за счёт сэкономленной электроэнергии аккумуляторы окупятся за 2,6 года, а общие затраты на удорожание троллейбуса за счёт установки ЛИА в размере 0,5 млн. грн. (1,6 млн. руб.) окупятся за 4,75–5 лет [1].

Преимущество использования различных видов городского пассажирского транспорта наглядно видно при сравнении их характеристик (табл. 3).

Таблица 3.

Сравнительные характеристики городских пассажирских транспортных средств.

№ п/п	Наименование показателей	Автобус с ДВС ЛиАЗ 5256	Троллейбус «Богдан» Т70115 с двигателем постоянного тока	Модернизированный троллейбус Škoda-9Tr с двигателем «Славянка»	Новый троллейбус СТ-6217 с системой автономного хода
1	Цена ТС	1100 тыс. грн. 4180 тыс. руб.	2500 тыс. грн. 9500 тыс. руб.	1300 тыс. грн. 4680 тыс. руб.	2500 тыс.грн. 9500 тыс. руб.
2.	Полная вместимость	100	110	70	110
3.	Максимальная масса	16,4 т	14,5 т	15,6 т	19,2 т
4.	Мощность двигателя	177 кВт	170 кВт	180 кВт	150 кВт
5.	Себестоимость на 1-го пасс.	2,1 грн./пасс.	1,011 грн./пасс.	0,8 грн./пасс.	0,75 грн./пасс.
6.	Себестоимость на 1 км пути	15,4 грн./км	9,6 грн./км	4,05 грн./км	5,9 грн./км
7.	Среднесуточный пробег	230–300 км			
8.	Годовой доход на 1 ТС	1543,0 тыс. грн.	701,3 тыс. грн.	490,9 тыс. грн.	701,3 тыс. грн.
9.	Годовые затраты на 1 ТС	1178,1 тыс. грн.	622,7 тыс. грн.	314,2 тыс. грн.	420,8 тыс. грн.
10.	Прибыль балансовая за год на 1 ТС	364,9 тыс. грн.	78,6 тыс. грн.	176,7 тыс. грн.	280,5 тыс. грн.
11.	Рентабельность	31%	12,6%	56%	66,7%
12.	Срок окупаемости	3,02 года	34,2 года	7,4 года	8,9 лет

Приведённые расчётные величины не учитывают экономии, достигаемой за счёт повышения эффективности использования энергосистем и основных производственных фондов. По мере прироста электроподвижного состава себестоимость перевозок будет падать за счёт повышения эффективности использования основных производственных фондов ГЭТ.

Выводы и предложения.

1. Электроподвижной состав приобретает свойство частичного автономного хода и повышенную маневренность, что позволит убрать контактную сеть и её спецучастки с отдельных площадей и улиц, проезжать повреждённые участки, продлить существующие маршруты на 10–15 км без дополнительных затрат, расширить троллейбусную маршрутную сеть за счёт возможности перехода с одной контактной линии на другую.

2. На автобусных маршрутах, имеющих частичный общий участок до 50% с троллейбусами, автобусы можно заменить на троллейбусы с автономным ходом.

3. Во время движения троллейбус с ЛИА постоянно потребляет энергию из контактной сети на движение и зарядку аккумуляторов. При автономном ходе используется энергия ЛИА. А при торможении троллейбус рекуперирует электроэнергию в сеть. Это позволяет экономить до 20% тяговой электроэнергии. Общая экономия электроэнергии с учётом экономии на ликвидации балластных пуско-тормозных сопротивлений, по предварительным подсчётам, составит около 50%.

4. Развитие маршрутной сети экологически чистого вида транспорта не потребует дополнительных финансовых затрат на содержание и ремонт контактно-кабельной линии, а также на тяговые подстанции на участках автономного хода. Предоставляется возможность повысить энергетическую и экономическую эффективность использования существующих контактно-кабельных линий и сооружений ГЭТ.

5. Предоставляется возможность создания и развития инфраструктуры, обеспечивающей эксплуатацию будущих электромобилей и электробусов.

6. Установка асинхронных электродвигателей с совмещенной обмоткой на троллейбусах с автономным ходом по сравнению с электродвигателем постоянного тока создаст ряд преимуществ: вес уменьшается на 230 кг, мощность увеличивается со 100 до 180 кВт, расход элек-

троэнергии на 1 км пути сокращается с 2,6 до 1,4 кВт·ч, простота конструкции уменьшает трудоёмкость ТО и ТР.

7. Стоимость модернизированного троллейбуса Škoda-9Tr соизмерима со стоимостью нового автобуса такого же класса, и в два раза дешевле нового троллейбуса СТ-6217 с системой автономного хода.

Хотя срок окупаемости автобуса в два раза меньше (3–3,5 года), чем у троллейбусов, рентабельность использования в 2 раза ниже, что уравновешивает их преимущества и недостатки. А если учесть экологический ущерб для окружающей среды в финансовом выражении, то преимущество троллейбуса возрастает многократно.

ЛИТЕРАТУРА

1. Проект организации серийного производства троллейбусов с большим автономным ходом на литий-ионных аккумуляторных батареях [Электронный ресурс]. – Режим доступа : http://mapget.ru/technology/troll_ST6217/.
2. Троллейбус с автономным ходом [Электронный ресурс] / С. И. Парфенов ; ОАО «Сибэлтранссервис». – Режим доступа : http://yandex.ru/clck/jsredir?from=yandex.ru%.
3. Разработано устройство, поддерживающее напряжение ионисторов постоянным [Электронный ресурс] // Nano News Net. – Режим доступа : http://www.nanonewsnet.ru/news/2012/razrabotano-ustroistvo-podderzhivayushchee-napryazhenie-ionistorov-postoyannym.
4. Электробус НЕФАЗ на литий-ионных аккумуляторах [Электронный ресурс] // Startbase. – Режим доступа : http://www.startbase.ru/knowledge/articles/141/.
5. Электробусы с дизельэлектростанцией [Электронный ресурс]. – Режим доступа : http://copy.yandex.net/?fmode=envelope.
6. Литий-ионные_батареи [Электронный ресурс]. – Режим доступа : http://ru.wikipedia.org/wiki/Литий-ионные_батареи.
7. Крымский троллейбус [Электронный ресурс]. – Режим доступа : http://ru.wikipedia.org/wiki/Крымский_троллейбус.
8. КРПП «Крымтроллейбус» [Электронный ресурс]. – Режим доступа : http://krymology.info/index.php.
9. Отчет о финансовых результатах (форма № 2), балансовый отчет о финансовом результате (Приложение 1) КРПП «Крымтроллейбус» за 2013 г. – 8 с.
10. Организация пассажирских автомобильных перевозок : методические указания / сост. Э. С. Сулейманов, А. У. Абдулгазис. – Симферополь : НИЦ КИПУ, 2008. – 112 с.
11. Концепции электроснабжения и электрификации транспорта Крыма / В. С. Тарасенко, Г. П. Подзноев ; Крымская Академия Наук. – Симферополь, 2013. – 10 с.

УДК 621.432

Эреджепов М. К., Абдулгазис А. У.

ВЛИЯНИЕ КАЧЕСТВА ОХЛАЖДАЮЩИХ ЖИДКОСТЕЙ НА РЕСУРС АВТОТРАКТОРНЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ

Аннотация. *Реализация заданного ресурса автотракторных двигателей неразрывно связана с качеством охлаждающих жидкостей, используемых в жидкостных системах автотракторных двигателей.*

В статье приводятся наработанные в условиях эксплуатации, требования к охлаждающим жидкостям. Охарактеризована пригодность природной воды, как охлаждающей жидкости применяемой для автотракторных двигателей, описаны последствия, вызванные повышенной коррозионной активностью антифризов низкого качества на систему охлаждения. Обоснованы и отмечены основные мероприятия, направленные на снижение коррозионно-накипного воздействия антифризов на жидкостные системы автотракторных двигателей.

Ключевые слова: *система охлаждения, ресурс двигателя, свойства охлаждающих жидкостей.*

Ереджепов М. К., Абдулгазіс А. У.

ВПЛИВ ЯКОСТІ ОХОЛОДНИХ РІДИН НА РЕСУРС АВТОТРАКТОРНИХ ДВИГУНІВ

Анотація. *Реалізація заданого ресурсу автотракторних двигунів нерозривно пов'язана з якістю охолодних рідин, які використовуються в рідинних системах автотракторних двигунів.*

У статті подаються напрацьовані в умовах експлуатації вимоги до охолодних рідин. Охарактеризовано придатність природної води, як охолодної рідини, яка застосовується для автотракторних двигунів, описано наслідки, спричинені підвищеною корозійною активністю антифризів низької якості на систему охолодження. Обґрунтовано й відзначено основні заходи, спрямовані на зниження корозійно-накипного впливу антифризів на рідинні системи автотракторних двигунів.

Ключові слова: *система охолодження, ресурс двигуна, властивості охолодних рідин.*

Eredzhepov M. K., Abdulgazis A. U.

INFLUENCE OF COOLANT LIQUIDS QUALITY ON AUTOMOTIVE ENGINES RESOURCE

Summary. *The results of long-term observations on the operation of automotive engines, the analysis of the technical state of parts of cooling systems of automotive engines, incoming repair, including radiators and engine blocks, showing the increased corrosion-crustaceous impact coolants are revealed in the article. The results of the analysis show the need for a current control input and corrosive effect on metal coolants cooling systems of automotive engines. The feasibility of using corrosion gage, allowing difference for each metal to evaluate the corrosive effects of the coolant is confirmed. The expediency of the list of required study of instrumentation for controlling the properties of fluids in the field is revealed.*

Key words: *system of cooling, resource of the engine, characteristics of cooling liquids.*

Постановка проблемы. Сегодня меняются подходы к системе обслуживания и ремонта автотракторной техники. Следует изменить технологию ремонтно-обслуживающих работ. Техническое обслуживание должно основываться на планово-предупредительной системе, а ремонты производиться в зависимости от технического состояния машин. В этом случае особое значение приобретает своевременное выполнение контрольно-диагностических операций и наличие соответствующего оборудования, приборов, инструментов. Переход на такую организацию обслуживания техники ведет к полному отказу от проведения капитальных ремонтов. В первую очередь это относится к автотракторным двигателям (АТД), топливной и гидравлической аппаратуре, гидротрансмиссиям, коробкам перемены передач и другим агрегатам [1].

Большое значение приобретает реализация в условиях эксплуатации заданного производителями ресурса автотракторной техники в целом и его агрегатов, важнейшим из которых является АТД. На снижение ресурса АТД существенное значение оказывает коррозионно-накипное воздействие охлаждающей жидкости (ОЖ) в охлаждающей системе (ОС). Это в основном связано с низким качеством ОЖ и, что не менее опасно, ухудшением ее свойств в процессе эксплуатации.

Анализ литературы. Доля отводимого теплового потока ОС от АТД по отношению к общему объему подводимого тепла к нему для бензиновых двигателей составляет 30–32%, для дизелей – 25–30%. Для реализации в полной мере заложенного ресурса АТД качество ОЖ должно удовлетворять следующему ряду физико-химических и теплофизических требований [2–4]:

- теплоемкость и теплопроводность должны быть высокими, позволяющими поддерживать оптимальный температурный режим АТД при небольшом количестве ОЖ и меньшей затрате мощности на привод за счет уменьшения скорости циркуляции;
- не должна образовывать различных отложений и вызывать коррозию на поверхностях ОС;
- температура кипения должна быть на 15–20°С выше максимально возможной, которая достигается в охлаждающей системе;
- температура замерзания должна быть не менее 5–10°С ниже минимальных температур окружающего воздуха;
- коэффициент расширения должен быть, по возможности, меньшим, так как при работе двигателя температура ОЖ изменяется в широких пределах;
- циркуляция ОЖ не должна вызывать вспенивания;
- быть химически стабильной в процессе эксплуатации и хранении;
- обладать оптимальной вязкостью, с одной стороны, не требующей больших затрат на циркуляцию ОЖ, с другой – исключающей потери жидкости через уплотнения;
- не быть токсичной и пожароопасной;
- быть доступной, иметь низкую стоимость.

В наибольшей степени этим требованиям отвечают вода либо водные растворы с двухатомным спиртом-этиленгликолем.

В табл. 1 приведены в сравнении основные физические показатели воды и технического этиленгликоля. За исключением температуры замерзания и кипения этиленгликоль явно уступает воде.

Но вода природного происхождения имеет ряд естественных загрязнителей, поэтому использование природной воды существенно отражается на ресурсе АТД.

Различают три вида природной воды: поверхностная (реки, озера, моря и океаны), атмосферная (дожди, снег), подземная (колодцы, скважины, родники). Наиболее существенным показателем, характеризующим применяемость природной воды в качестве охлаждающей жидкости, является ее жесткость.

По жесткости вода классифицируется на очень мягкую, мягкую, среднежесткую, жесткую и очень жесткую. В табл. 2 приведена классификация жесткости воды и ее влияние на накипеобразование.

Таблица 1.

Основные физические показатели воды и технического этиленгликоля.

Показатель	Вода	Этиленгликоль технический
Формула	H_2O	$C_2H_4(OH)_2$
Молекулярная масса	18,01	62,07
Плотность при 20°С, кг/м^3	998,2	1113
Температура замерзания, °С	0	–12
Температура кипения при 0,1 МПа, °С	100	197,7
Теплоемкость при 20°С, кДж/(кг·°С)	4,184	2,422
То же, при 0°С	2,04	–
Удельная теплопроводность, кДж/(ч·м·°С)	2,179	0,955
Вязкость при 20°С, мм^2/с	1,0	19–20
Теплота испарения, Дж/кг	2258	800
Теплота плавления, Дж/кг	332,7	182,3
Коэффициент объемного расширения (в пределах от 4 до 100°С)	0,00046	0,00062
Температура вспышки (прибор с открытым тиглем), °С	–	122

Таблица 2.

Классификация жесткости воды.

Группа жесткости	Общая жесткость, мг-экв/л	Влияние на накипеобразование
Очень мягкая	до l,5	Накипи не образует
Мягкая	1,5–4,0	Накипи почти не образует
Среднежесткая	4,0–8,0	Образует накипь. Необходимо не реже 2 раза в год удалять из системы охлаждения
Жесткая	8,0–12,0	Быстро откладывается значительная накипь, не рекомендуется применять воду без предварительного умягчения или использования присадок
Очень жесткая	более 12,0	Система охлаждения очень быстро забивается накипью. Воду применять без умягчения нельзя

Жесткость воды характеризуется количеством растворенных в воде солей (карбонатов и сульфатов). Чем больше в воде растворено этих солей, тем больше отложений (накипи) образуется на стенках системы охлаждения. В зависимости от вида растворенных солей различают временную и постоянную жесткости. Временная, или карбонатная, жесткость определяется содержанием в воде бикарбонатов магния и кальция. При нагревании воды эти соли разлагаются и образуют нерастворимые в воде $CaCO_3$ и $MgCO_3$, которые в виде накипи осаждаются на стенках системы охлаждения.

Присутствие в воде сульфатов, хлоридов и силикатов, щелочноземельных металлов, которые не разлагаются при ее нагревании, особенно нежелательно. Наличие этих солей в воде определяет некарбонатную, или постоянную, жесткость. Например, сульфат кальция $CaSO_3$ (гипс) при повышении температуры выпадает из раствора, осаждаясь на стенки системы вместе с другими солями. Это придает накипи особую прочность, затрудняющую ее удаление из системы. Следует иметь в виду, что теплопроводность накипи значительно уменьшается и при попадании нефтепродуктов, особенно масла.

Измеряется жесткость в миллиграмм-эквивалентах солей жесткости на 1 л воды (мг-экв/л). 1 мг-экв соответствует содержанию в 1 л воды 20,04 мг иона кальция или 12,16 мг иона магния.

Присутствие в воде кислорода, окиси углерода и других газов, особенно хлор- и сульфат-ионов, вызывает коррозионно-накипные образования.

Хорошие результаты получаются при фильтровании воды любой жесткости через катионитовые фильтры, т. е. вещества, способные вступить в обменную реакцию с ионами кальция, магния и других щелочноземельных металлов. Катионированная вода не вызывает накипи, однако увеличивает коррозионную активность воды [5–9].

Предприятия-изготовители АТД, допускающие применение воды в ОС АТД, устанавливают следующие требования к качеству воды [10]:

- степень жесткости не более 2,15 мг-экв/л (43 мг/л CaO);
- водородный показатель pH (при 20°С) 6–8;
- содержание ионов Cl не более 100 мг/л;
- содержание ионов SO_4 не более 100 мг/л;
- общее содержание солей (остаток после испарения) не более 200 мг/л.

В случае жесткости воды более 2,15 мг-экв/л производится ее «умягчение». Для этого добавляют в воду карбонат натрия (Na_2CO3) в количестве 0,4%. «Умягчение» воды проводится вне ОС

АТД, так как эта операция сопровождается выделением солей кальция и магния, которые удаляются отстаиванием и фильтрацией. Для частичного устранения жесткости воду кипятят и дают ей отстояться, а затем профильтровывают. При этом также даются рекомендации по удалению накипи.

Накипь из ОС рекомендуется удалять с помощью раствора технического трилона Б (ТУ 6-01-634-71) в воде концентрации 20 г трилона на 1 л воды. Трилон – порошок белого цвета, не ядовит, легко растворяется в воде, не вызывает вспенивания воды при ее нагреве и кипячении. Излишнее количество трилона не вредит деталям ОС.

Раствор трилона заливается в ОС. После одного дня работы двигателя (не менее 6–7 час) отработанный раствор сливается и заливается свежий. Промывку продолжают в течение четырехпяти дней. После окончания промывки в систему охлаждения заливается вода, содержащая 2 г/л трилона.

При отсутствии трилона Б, как исключение, накипь из ОС допускается удалять раствором, состоящим из кальцинированной (стиральной) соды в количестве 0,5 кг на 10 л воды и керосина 1,0 кг на 10 л воды. Раствор заливается в ОС на 24 часа, из которых двигатель не менее 8 часов должен работать на эксплуатационном режиме, после чего сливается раствор в горячем состоянии, а после охлаждения АТД промывают ОС водой.

В последние десятилетия в качестве основной охлаждающей жидкости для АТД применяют антифризы. Антифриз представляет собой раствор этиленгликоля, дистиллированной воды с пакетом присадок. Три перечисленных составляющих должны придавать антифризу необходимые физико-химические и теплофизические свойства ОЖ. Пакет присадок является главной компонентой, определяющей качество. По качественному составу присадок антифризы условно подразделяют на три основные группы: нитрофосфатные, карбоксилатные и гибридные. При выборе марки антифриза единственно верным критерием могут быть рекомендации производителей АТД, вписывающие марки антифризов в эксплуатационную документацию. Возможность применения конкретной марки антифриза предприятия-изготовители АТД устанавливают на основе лабораторных и продолжительных эксплуатационных испытаний. Комплекс и объем испытаний могут стандартизовываться производителями АТД.

Цель работы – провести анализ применения ОЖ низкого качества в ОС АТД. Обосновать основные предложения, направленные на снижение коррозионно-накипного воздействия в ОС и повышение ресурса АТД.

Изложение основного материала. Одним из важнейших параметров АТД является его ресурс до капитального ремонта, фактически определяющий его конструкторско-технологическую надежность. Величина ресурса не приводится в эксплуатационной документации на двигатель или других официальных документах. Срок службы АТД [10] зависит во многом от условий эксплуатации и качества ТО и ТР.

Многолетние наблюдения эксплуатации АТД 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.

Конструкции АТД представляют собой сложную в электрохимическом отношении полиметаллическую систему, состоящую из разнородных металлов: стали, чугуна, алюминия, латуни, припоя и др. При работе АТД в ОС создаются высокие температурные и механические нагрузки, вибрация деталей, аэрация охлаждающей жидкости, перепады давления. ОЖ, непосредственно соприкасающаяся с рабочими поверхностями ОС АТД, выполняет свою основную функцию теплоносителя, вместе с тем является и электролитом, представляя собой постоянно функционирующий критический состав [11].

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

Температура при работе в АТД колеблется в широких пределах [11] от –20°С (температура запуска) до 2000°С (температура газов в цилиндре) и более. Из-за образования термоизолирующей оболочки коррозионно-накипных наростов в ОС, резких температурных колебаний в широких пределах, ввиду различных коэффициентов расширения конструкционных сопрягаемых материалов АТД наблюдаются следующие процессы: увеличивается средняя температура деталей цилиндро-поршневой группы, за счет снижения наполнения цилиндров снижается эффективная мощность АТД, повышается расход топлива, увеличенная температура цилиндро-поршневой группы приводит к увеличению температуры смазки и, как следствие, увеличению темпа износа деталей цилиндро-поршневой группы.

Из-за различия температурного расширения конструкционных металлов поршневой группы АТД зазоры снижаются до критических значений.

На рис. 1 приведена характеристика уменьшения теплового зазора бензинового двигателя в сопряжении «поршень – цилиндр» при повышении температуры головки поршня.

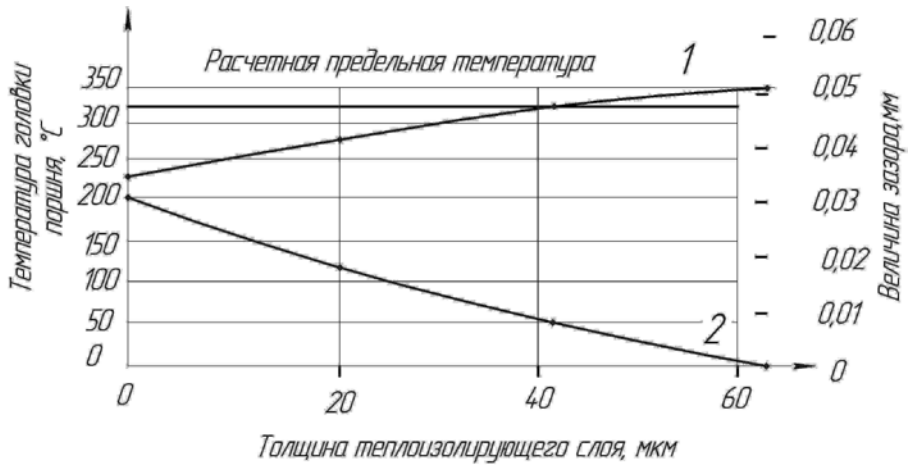


Рис. 1. Влияние теплоизолирующих отложений на повышение температуры головки поршня (1) и уменьшение зазоров в сопряжении «поршень – цилиндр» (2) [12].

На рис. 1 видно, что при толщине теплоизолирующего слоя 60 мкм на гильзе величина зазора между поршнем и цилиндром уменьшается до 0 мкм, что является критическим для ДВС, это может привести к задирам рабочих поверхностей и заклиниванию цилиндро-поршневой группы. В результате коррозии и попадания антифриза в масло двигателя происходит интенсивный износ шатунных вкладышей. На рис. 2 показана характеристика износа.

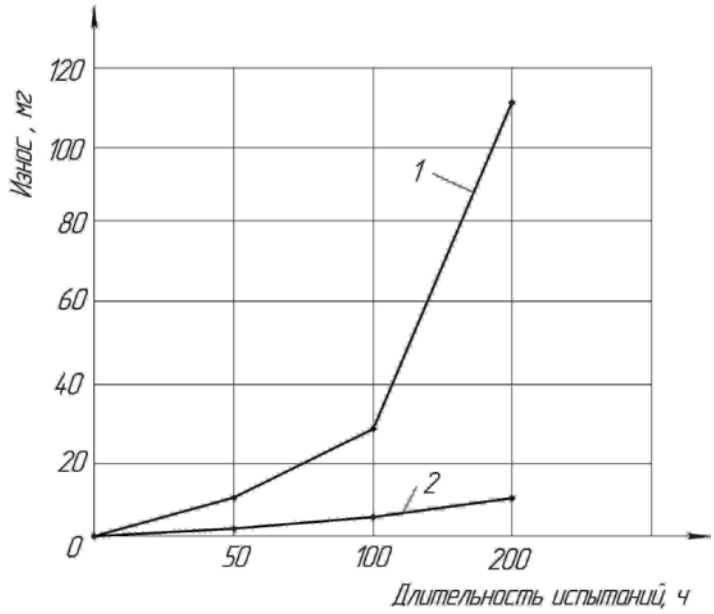


Рис. 2. Влияние охлаждающей жидкости в масле на износ шатунных вкладышей: 1 – чистое масло, 2 – масло с добавкой 1% антифриза.

Исследование двигателей ВАЗ [12] показало, что детали двигателей, работающих на маслах, содержащих ОЖ, изнашиваются в несколько раз быстрее, и поэтому уже через 20–50 тыс. км требуется капитальный ремонт (при расчетных 150 тыс. км и более).

На рис. 3 показан разрез головки блока двигателя IVEKO (V = 3,6 л), поступившего на ремонт в результате образовавшейся в нем трещины. Материал головки блока – легированный чугун. Как видно, охлаждающая теплоотдающая поверхность полости 1 подверглась активному коррозионно-накипному воздействию со стороны ОЖ, толщина наростов составляет 3–6 мм. В то же время следы коррозии и накипных образований отсутствуют на внешней поверхности втулки 3, которая также контактировала с охлаждающей жидкостью. Причем на охлаждаемой поверхности втулки сохранен рельеф обработки режущим инструментом (рис. 4).

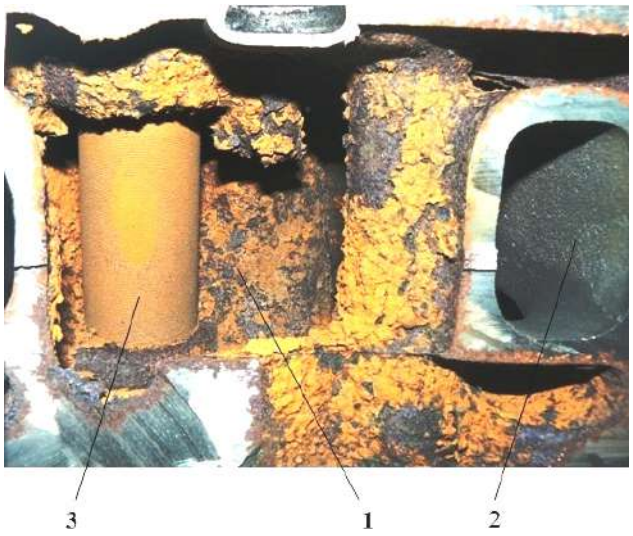


Рис. 3. Сечение участка головки блока двигателя IVEKO (*V* = 3,6 л):
1 – охлаждающая полость рубашки охлаждения;
2 – полость впускного коллектора воздуха;
3 – внешняя поверхность втулки для установки топливной форсунки.

Рис. 4. Рельеф участка внешней поверхности втулки топливной форсунки.

Предположительно, в качестве охлаждающей жидкости использовался антифриз, где отсутствовали присадки по защите чугуна. Отсутствие следов коррозии и коррозионных наростов на внешней поверхности топливной форсунки показывает низкую коррозионную активность к железу неингибированного антифриза, а также отсутствие в жидкости сульфатов и хлоридов, которые содержатся в необработанной воде. Кроме того, данная поверхность является тепловоспринимающей, менее коррозионно-образующей, где тепловой поток направлен от охлаждающей жидкости к поверхности втулки. Анализ ситуации показывает, что на тепловоспринимающих поверхностях втулки 3 (рис. 4) и теплоотдающей поверхности 1 головки блока (рис. 3) тепловой поток направлен от горячей поверхности к жидкости.

Таким образом, проведенный анализ поверхностей теплообмена чугунной головки дизельного двигателя IVECO объемом 3,6 л показал, что данный двигатель заправлялся антифризом, представлявшим собой раствор деминерализованной воды и этиленгликоля, где отсутствовала присадка (ингибитор) по защите чугуна.

На предприятиях и хозяйствах автотракторной техники контроль коррозионно-накипного воздействия ОЖ на ОС АТД не производится.

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 применительно к различным металлам.

Использование названных приборов в технологии инструментального контроля коррозионного воздействия позволит существенно улучшить качество обслуживания АТД при решении проблем снижения коррозионно-накипных образований.

Выводы.

1. Проведенный анализ показывает необходимость введения входного контроля, а также текущего контроля коррозионного воздействия охлаждающих жидкостей на металлы ОС АТД.

2. Использование коррозиметра позволяет дифференцированно по каждому металлу ОС оценивать коррозионное воздействие ОЖ.

3. Для реализации в полной мере ресурса АТД необходимо определить и обосновать необходимый перечень измерительных приборов для контроля свойств охлаждающей жидкости в условиях эксплуатации.

ЛИТЕРАТУРА

1. Беренштейн И. Б. Состояние и перспективы механизации сельского хозяйства Крыма / И. Б. Беренштейн // Научные труды Южного филиала национального университета биоресурсов и природопользования Украины «Крымский агротехнологический университет». Выпуск 150. Технические науки. – Симферополь, 2012. – С. 173–181.
2. Покровский Г. П. Топливо, смазочные материалы и охлаждающие жидкости / Г. П. Покровский. – М. : Машиностроение, 1985. – 300 с.
3. Двигатели внутреннего сгорания. Устройство и работа поршневых и комбинированных двигателей /

под ред. А. С. Орлина, М. Г. Круглова. – М. : Машиностроение, 1980. – 288 с.
4. Итинская Н. И. Автотракторные эксплуатационные материалы / Н. И. Итинская, Н. А. Кузнецов. – М. : Высшая школа, 1978. – 232 с.
5. Фейзиев Г. К. Высокоэффективные методы умягчения, опреснения и обессоливания воды / Г. К. Фейзиев. – М. : Энергоатомиздат, 1988. – 193 с.
6. Водоподготовка. Процессы и аппараты / под ред. О. И. Мартыновой. – М. : Атомиздат, 1977. – 352 с.
7. Клячко В. А. Очистка природных вод / В. А. Клячко, И. Э. Апельцин. – М. : Стройиздат, 1978. – 222 с.
8. Классификация физико-химических методов обработки воды / [З. Я. Ярославский, Г. Н. Николадзе, П. П. Пальгунов, Б. И. Долгоносов] // Водные ресурсы. – 1974. – № 2. – С. 120–126.
9. Справочник по свойствам, методам анализа и очистке воды / под ред. Л. А. Кульского.– К. : Наукова думка, 1980. – Т. 1. – 680 с. ; Т. 2. – 1206 с.
10. Двигатели ЯМЗ-236М2, ЯМЗ-238М2. Руководство по эксплуатации 236-3902150-БРЭ. – Ярославль, 2010. – 172 с.
11. 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.
12. Ковтун Г. Охлаждающие жидкости и их влияние на ресурс двигателя / Г. Ковтун, В. Пилявский, А. Жерновой // Сигнал, Украинский автомобильный журнал. – 2004. – № 5-6. – С. 64.

Раздел 2. СОВРЕМЕННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ В МАШИНОСТРОЕНИИ

УДК 621.914.02

Покинтелица Н. И.

ПРОЦЕСС СТРУЖКООБРАЗОВАНИЯ И КАЧЕСТВО ПОВЕРХНОСТИ ПРИ ЭЛЕКТРОФРИКЦИОННОЙ РАЗРЕЗКЕ ЗАГОТОВОК

Аннотация. *В статье представлены результаты исследований особенностей процесса стружкообразования при электрофрикционной разрезке заготовок дисковыми пилами трения. Показано, что теплота трения, генерируемая в процессе резания, и влияние электрического тока, аккумулируются в относительно небольшом объеме реза. Приведены показатели качества обработанных поверхностей, указывающие на незначительную глубину проникновения пластической деформации, наблюдаемую при различных величинах скорости подачи заготовок.*

Ключевые слова: *электрофрикционная разрезка, напряжения, дисковая пила трения, стружка, деформация, температура.*

Покинтелиця М. І.

ПРОЦЕС СТРУЖКОУТВОРЕННЯ ТА ЯКІСТЬ ПОВЕРХОНЬ ПРИ ЕЛЕКТРОФРИКЦІЙНІЙ РОЗРІЗЦІ ЗАГОТОВОК

Анотація. *У статті представлено результати досліджень особливостей процесу стружкоутворення при електрофрикційній розрізці заготовок дисковими пилами тертя. Показано, що теплота тертя, що генерується в процесі різання, і вплив електричного струму акумулюються у відносно невеликому обсязі різу. Наведено показники якості оброблених поверхонь, що вказують на незначну глибину проникнення пластичної деформації, що спостерігається при різних величинах швидкості подачі заготовок.*

Ключові слова: *електрофрикційна розрізка, напруги, дискова пила тертя, стружка, деформація, температура.*

Pokintelitsa N. I.

PROCESS OF CHIP FORMATION AND SURFACE QUALITY IN ELECTROFRICTIONAL CUTTING OF WORKBLANKS

Summary. *Results of research of chip formation process features at electrofrictional cutting of workblanks by disk saws of friction are presented in the article. It is shown that the warmth of friction generated in the course of cutting and the influence of the electric current are accumulated in rather small volume of a cut. Indicators of quality of the processed surfaces, penetration of the plastic deformation indicating insignificant depth observed at various sizes of speed of giving workblanks are revealed.*

Methods for machine processing of complex surfaces of parts which are based with due account taken of the dynamic properties of the technological system of the machine are proposed. Tools and equipment for machine processing parts by melting the surface layer and the formation of the machined surface with a given waviness, which depends on the adjustment of the dynamic parameters of equipment, which determine the general dynamical properties of the technological system of the machine are developed. The regularities of the work processes flow of molten metal at thermoclutch processing are determined. The dynamic oscillatory processes in the technological system are theoretically studied. The results of mathematical modeling accord with experimental data. The waviness and solidity of the machined surface are experimentally determined. Spectral analysis of waviness with definition of the characteristic harmonic components of the profile is performed. Studies are supplemented by electron microscopy and by measuring solidity of the surface. It is shown that the solidity of the machined surface is 2…4 higher than the solidity of the workblank. The possibility of obtaining discontinuous surfaces with high anti-friction properties and surface alloying components during processing was grounded.

Key words: *electrofrictional cutting, stresses, friction circular saw, chip, deformation, temperature.*

Постановка проблемы. Электрофрикционная разрезка (ЭФР) металла дисковыми пилами трения представляет собой комбинированный способ обработки, основанный на сочетании механических и электрофизических явлений, направленных на интенсивное удаление металла с обрабатываемой заготовки [1]. Это сочетание не равнозначно простому суммированию термо-

фрикционной и электроэрозионной разрезки, поскольку указанные процессы оказывают взаимное влияние друг на друга. Однако анализ каждой из составляющих способствует выработке углубленного представления о сущности явлений, определяющих специфику ЭФР.

На участках разрезки заготовок существенное влияние на качество оказывает работа дисковых пил трения. Качество разрезки в настоящее время нельзя считать соответствующим уровню мировых стандартов из-за значительной косины реза, подгибки концов, большой величины заусенца, что зачастую является следствием нестабильной работы инструмента. С другой стороны, установка пил в основном технологическом потоке предопределяет высокие требования к их производительности и надежности [2].

Процесс ЭФР металла пилами трения очень специфический, а его исследование связано с большими трудностями. Характер явлений, происходящих в зоне резания, можно установить, прежде всего, на основе анализа косвенных показателей и зависимостей (температура и давление в зоне резания, скорость деформации, вид стружки и др.).

Исходя из этого, исследование процесса стружкообразования имеет большое значение. Форма и цвет образованной стружки позволяют провести анализ происходящих деформационных процессов и изучить качественную сторону протекания процесса резания. Знание закономерностей процесса стружкообразования и сопровождающих его явлений позволяет рационально управлять им и изготовлять детали более качественно, производительно и экономично.

Анализ научных публикаций. Известны результаты теоретических и экспериментальных исследований процесса фрикционной разрезки заготовок различного сечения. Проведенные исследования позволили создать математические модели энергосиловых и тепловых процессов, происходящих с инструментом [1], а также рассмотреть вопросы, связанные с его прочностью.

В литературе были опубликованы сведения, связанные со стойкостью пилы трения и ее расчетом. Исследован в лабораторных условиях расход энергии в процессе разрезки различных марок сталей при температурах 600...1000°С; предложены методики определения мощности двигателя привода дисковой пилы; рассмотрены вопросы выбора скорости подачи, конструкций дисков пил [3; 4]. Было установлено, что при разрезке стальных заготовок за счет трения в зоне реза металл очень быстро достигает температуры плавления, и жидкая фаза удаляется диском пилы из контактной зоны [1]. Доказано, что теплота, выделившаяся в прорези, распределяется между диском и материалом прямо пропорционально коэффициентам их теплопроводности. Температура в зоне резания зависит от окружной скорости инструмента [4; 5]. Приводятся описания конструкций пил горячей резки. Рекомендовано в качестве материала для изготовления дисков применять углеродистую сталь с содержанием марганца до 1%, временным сопротивлением 800...900 МПа и относительным удлинением 12–14% [2]. Результаты исследований влияния режимов резания на составляющие силы резания и непосредственно на стойкость дисков представлены в работах [4; 5]. Было определено, что с увеличением скорости подачи усилия резания увеличиваются, однако зависимость между этими величинами нелинейная. Усилие резания может быть принято пропорциональным квадратному корню из толщины срезаемого слоя.

Установлено, что удельное сопротивление резанию (удельная работа разрезания) является функцией многих факторов, в частности, ее уровень определяется механическими и теплофизическими свойствами, температурой разрезаемого материала и режимами резания [5].

Значительный теоретический и практический интерес представляют работы по разработке основ управления структурой и параметрами технологических систем фрикционной разрезки [6; 7].

Несмотря на большой объем проведенных исследований, многие сведения по определению особенностей процесса фрикционной разрезки отсутствуют или носят противоречивый характер.

Цель работы – исследование особенностей процесса стружкообразования при ЭФР, что позволит выполнить анализ происходящих деформационных явлений, изучить качественную сторону протекания процесса с перспективой повышения его производительности и безопасности.

Изложение основного материала. Процесс снятия стружки при ЭФР металлов пилой трения имеет принципиально одинаковую схему с процессом отделения стружки при высокоскоростном резании металлов дисковыми пилами [1]. Но высокие мгновенные температуры, развивающиеся при ЭФР, резко повышают пластичность деформируемого металла и создают возможность снятия стружек округленной пилой трения. Процесс срезания стружки пилой трения происходит примерно за 0,002...0,0004 с, т. е. практически является мгновенным.

Пила трения имеет угол резания, значительно превышающий 90°, и снимает тончайшие стружки на очень большой скорости резания (30–40 м/с). В связи с этим при снятии отдельных стружек пилой трения большое значение приобретают тепловые явления и силы трения [2].

При ЭФР пила трения, находясь постоянно в контакте с нагретым до температуры 1100–1250°С металлом заготовок, нагревается до температуры 60–90°С, в то время, когда каждая частица металла разрезаемых заготовок находится постоянно во взаимодействии с различными точками режущей кромки пилы. Теплота трения, генерируемая при ЭФР, и тепловое влияние электрического тока аккумулируются в относительно небольшом объеме реза, температура которого почти мгновенно достигает точки плавления, в результате чего размягченные и расплавленные макрообъемы металла удаляются из проема пилой трения. Таким образом, удаление припуска при ЭФР происходит в результате расплавления и частичного испарения частиц удаляемого металла заготовок с последующим выбросом их образующимися наростами и воздушным потоком, создаваемым в зазоре пилой трения. Кроме того, движение пилы трения обеспечивает механический вынос, вымывание и выдавливание частиц металла из зоны обработки [3].

При обработке металла с локализованным подогревом срезаемого слоя чаще всего образуется сливная стружка. Повышая мощность источника высококонцентрированного локального нагрева срезаемого слоя, можно добиться того, что стружка получится двойной. Ее разделяет зона проплавления, глубина которой равна толщине стружки или больше ее. Часть металла при этом в расплавленном виде удаляется с обрабатываемой поверхности заготовки. В этом случае сочетается два процесса: плавление и механическая обработка. Чрезмерный подогрев срезаемого слоя негативно сказывается на устойчивости пилы трения, поэтому для каждого обрабатываемого металла при определенных режимах резания существует оптимальная температура нагрева срезаемого слоя. За счет повышения температуры стружки при обработке с нагревом, в зоне ее контакта с пилой трения образуется текущий слой, способствующий уменьшению силы трения между стружкой и пилой трения. Твердость срезаемого слоя уменьшается из-за того, что при обработке с нагревом за счет снижения прочности металла он меньше подвергается упрочнению в зоне контакта пила трения – стружка. Разогретый металл текущего слоя имеет другие характеристики, чем при обычном резании: становится текущим, вязким и является естественным смазочным веществом. Чем сильнее размягчается текущий слой, тем больше его смазывающий эффект и выше стойкость пилы трения.

Общее число стружек, снимаемых пилой трения в единицу времени, очень велико. Стружка, образующаяся при ЭФР (рис. 1), включает в себя части различной формы стружки надлома, частицы шаровидной формы, образовавшиеся при охлаждении расплавленного металла, фрагменты фрезерной сливной стружки или стружки скалывания, и элементы нароста.

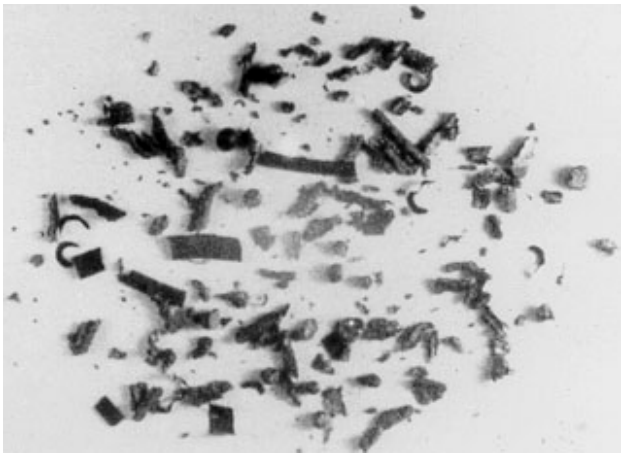


Рис. 1. Стружка, полученная при ЭФР.

Размеры этих частичек порядка 1,2–1,6 мм, но большинство частичек имеют размеры, не превышающие 0,2–0,4 мм. Процентный состав каждого вида частиц зависит от условий обработки и может изменяться в больших пределах. На рис. 2 приведена зависимость количества стружки от ее размера.

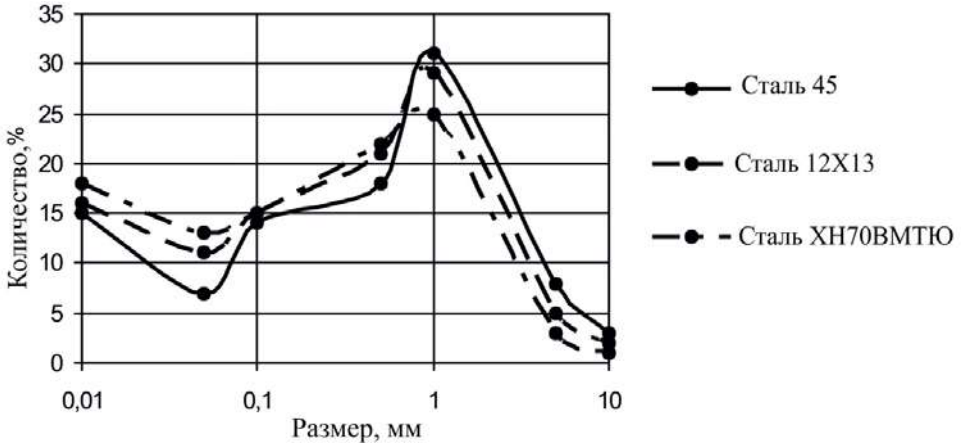


Рис. 2. Зависимость количества стружки от ее размера.

При ЭФР пилами трения наблюдается и хрупкое разрушение нагретого металла, что подтверждается наличием частиц типа стружки надлома. Фрезерная стружка образуется при разрезании боковых поверхностей заготовок. Количество фрезерной стружки очень мало, поэтому процесс разрезки играет незначительную роль в разрушении заготовок. Роль лезвия выполняет окружная кромка пилы трения или нарост на ее передней поверхности. Частицы нароста достигают значительной длины и ширины (до 12×3 мм).

На основании проведенных исследований можно предположить, как происходит процесс стружкообразования (см. рис. 3).

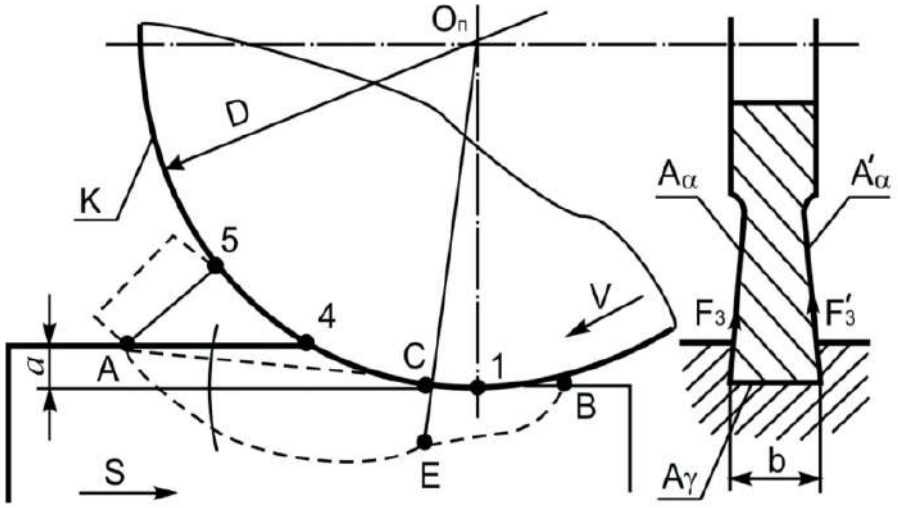


Рис. 3. Схема стружкообразования при ЭФР.

Сила тока и рабочие поверхности пилы трения приводят металл в пластическое состояние перед собой и на некоторую глубину *a* за линией среза. Образующаяся стружка отрывается от передней поверхности пилы трения *K* немного дальше (в точке 5).

Как только металл получает возможность пластического течения, на участках 1–4 и 4–5 пластического и упругого контактов появляются внешние силы, под действием которых металл в пластической зоне получает дополнительную, вторичную пластическую деформацию. По задним поверхностям $A\alpha$, $A'\alpha$ (торцам пилы трения) происходит то же, что и по передней поверхности $A\gamma$, т. е. имеются такие же силы трения на участках пластического и упругого контактов (F'_3 и F_3). Вследствие этого линии среза через упругие деформации смещаются и режущие кромки омываются пластичным металлом, что благоприятно сказывается на устойчивости пилы трения.

Исследования показали [4], что для практически применяемых режимов резания длина пластической зоны сравнительно велика и достигает трех-пяти толщин среза.

При изменении одного из внешних факторов (скорость резания *V* и подачи *S*, толщина *a* и ширина *b* среза, диаметр пилы трения *D*, технологическая среда) изменяются контактные силы трения. Кроме того, меняется строение текстуры металла и стружки. Поэтому текстура стружки может быть своего рода интегральным критерием оценки степени пластической деформации и сил резания.

Исследования, проведенные при обработке различных материалов (конструкционных сталей, жаропрочных и титановых сплавов) в широком диапазоне изменения скорости резания, свидетельствуют о неоднозначном влиянии этих факторов на формирование контактной зоны и величину коэффициента деформации.

Это связано с тем, что, с одной стороны, высокая температура срезаемого слоя в контактной зоне и отсутствие нароста способствуют значительному уменьшению коэффициента трения и сопротивления пластическому сдвигу на участке пластического контакта. С другой стороны, проявляется склонность к предельно адгезионному взаимодействию между обрабатываемым и инструментальным материалами, особенно при обработке жаропрочных сплавов. В свою очередь, предельная адгезия влияет на формирование контактной зоны, увеличивая сопротивление пластическому сдвигу, что неизбежно приводит к росту коэффициента деформации.

После разделения металла с использованием способа ЭФР на торцах заготовок образуются риски, облой и заусенцы. Визуальное изучение поверхностей заготовок показало, что качество разреза (шероховатость обработанной поверхности, облой и заусенцы) двух заготовках примерно одинаково. Ухудшения качества торцевых поверхностей разрезанных заготовок по мере износа пилы трения не наблюдалось.

При исследовании зоны резания были изготовлены и изучены микрошлифы разрезаемого металла во фронтальной и боковой зонах резания (рис. 4, 5).

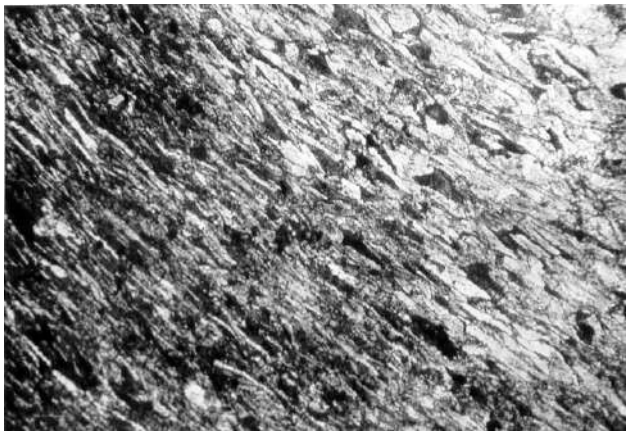


Рис. 4. Микрошлиф фронтальной зоны резания (увеличение ×350).

Рис. 5. Микрошлиф боковой зоны резания (увеличение ×200).

Как видно на рис. 4, 5, при ЭФР наблюдается незначительная пластическая деформация разрезаемого металла.

Безусловно, полученные данные не раскрывают полностью состояние материала в самом процессе резания, а дают лишь некоторое представление о распределении деформации.

При термофрикционной обработке стружка обдувается воздухом и охлаждается неравномерно и быстрее, чем внутренние слои. Таким образом, упрочнение в различных точках остывшей стружки есть следствие не только неравномерной деформации, но и неравномерного охлаждения. Поэтому, чтобы знать истинную картину процесса резания, необходимо изучить закономерности деформационных явлений в контактной зоне.

Глубина проникновения пластической деформации, наблюдаемая при различных величинах подач, приведена в табл. 1.

Таблица 1.

Влияние подачи на глубину деформации при ЭФР металла.

Величина подачи *S*, мм/мин	Глубина деформации в зоне, мм	
	фронтальной	боковой
125	0,017	0,009
160	0,033	0,037
200	0,036	0,039
250	0,044	0,046
315	0,051	0,059

На основании данных табл. 1 можно сделать вывод о том, что с увеличением скорости подачи увеличивается глубина деформации металла.

Выводы.

1. По результатам исследований установлено, что при ЭФР образуются различные типы стружек, количественный состав которых зависит от условий обработки.

2. Образование стружки надлома подтверждает наличие процесса хрупкого разрушения нагретого металла.

3. В разрезаемом металле наблюдается незначительная пластическая деформация, которая хорошо влияет на качество обработанных поверхностей.

4. Полученные результаты предоставляют возможность прогнозировать особенности процесса стружкообразования при ЭФР сталей других марок.

Перспективным направлением дальнейших исследований является изучение динамических характеристик процесса ЭФР.

ЛИТЕРАТУРА

1. Зарубицький Є. У. Розробка й дослідження процесу ефективності термофрикційної обробки матеріалів / Є. У. Зарубицький. – К. : ВІПОЛ, 1993. – 76 с.
2. Борисов Б. Я. Высокоскоростное резание металлов пилами / Б. Я. Борисов. – К. : Высшая школа, 1970. – 91 с.
3. Балакин В. А. Трение и износ при высоких скоростях скольжения / В. А. Балакин. – М. : Машиностроение, 1980. – 136 с.
4. Вольф В. Ф. Пилы для резания горячего металла / В. Ф. Вольф. – Свердловск : Изд-во УПИ, 1970. – 118 с.
5. Серегин С. А. Температура контактной поверхности при трении металлов / С. А. Серегин, В. И. Люленков // Тепловая динамика трения. – М. : Наука, 1970. – С. 122–126.
6. Сизый Ю. А. Теория и практика фрикционной разрезки / Ю. А. Сизый. – Харьков, 1995. – 333 с.
7. Гаркунов Д. Н. Виды трения и износа. Эксплуатационные повреждения деталей машин / Д. Н. Гаркунов, П. И. Корник. – М. : Изд-во МСХА, 2003. – 344 с.

УДК 621.923

Ягьяев Э. Э., Ярошенко А. А.

Z-ПРЕОБРАЗОВАНИЕ ДИСКРЕТНЫХ СИСТЕМ МОНИТОРИНГА И УПРАВЛЕНИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ ПРОЦЕССА ШЛИФОВАНИЯ

Аннотация. *В статье предложена методика математического описания и анализа системы мониторинга процессом шлифования. Данный процесс имеет четко выраженные периоды квантования, изменения каждого параметра технологической системы имеют свои частотные, скоростные и временные характеристики. Для анализа технологической системы процесса шлифования можно использовать метод Z-преобразования передаточной функции, что позволит обеспечить высокую эффективность процесса шлифования и возможность ее применения в автоматизированном производстве. Применение Z-преобразования позволяет отразить основные операции цифровой обработки сигналов: задержки на определенное число тактов, умножения отсчетов сигнала на весовые коэффициенты и сложения.*

Ключевые слова: *мониторинг, диагностика, управление, шлифование, Z-преобразование.*

Ягьяєв Е. Е., Ярошенко О. О.

Z-ПЕРЕТВОРЕННЯ ДИСКРЕТНИХ СИСТЕМ МОНІТОРИНГУ ТА УПРАВЛІННЯ ТЕХНОЛОГІЧНОЇ СИСТЕМИ ПРОЦЕСУ ШЛІФУВАННЯ

Анотація. *У статті запропонована методика математичного опису та аналізу системи моніторингу процесом шліфування. Цей процес має чітко виражені періоди квантування, зміни кожного параметра технологічної системи мають свої частотні, швидкісні й часові характеристики. Для аналізу технологічної системи процесу шліфування можна використовувати метод Z-перетворення передавальної функції, що дозволить забезпечити високу ефективність процесу шліфування й можливість її застосування в автоматизованому виробництві. Застосування Z-перетворення дозволяє відобразити основні операції цифрової обробки сигналів: затримки на певне число тактів, множення відліків сигналу на вагові коефіцієнти й складання.*

Ключові слова: *моніторинг, діагностика, управління, шліфування, Z-перетворення.*

Yagyaev E. E., Yaroshenko A. A.

Z-TRANSFORMATION OF DISCRETE SYSTEMS OF MONITORING AND CONTROL OF TECHNOLOGICAL SYSTEM OF GRINDING PROCESS

Summary. *The paper proposes a method of mathematical description and analysis of the system of grinding process monitoring. This process has distinct quantization periods, the changes of each technological system parameter have their frequency, speed and time characteristics. The performed analysis shows changes in each parameter of technological system. They do not form a continuous spectrum, and are good enough to distinguish the presence of the control dynamics of the output variables of the grinding operation. Having the data on the dynamics of the output variables it is always possible to determine the type of disturbances and changes in technical systems and introduce a correction in the management of the treatment process, and to calculate the time interval in which it is necessary to take into account certain changes in the production system.*

Grinding process is characterized as signs of discrete and continuous systems. There is a powerful, well-studied mathematical apparatus constructed on the basis of the Laplace transform for continuous systems. But the application of this transformation to the digital system is impossible. To analyze the technological process of grinding the method of Z-transformation of the transfer function, which will ensure high efficiency of the grinding process and the possibility of its use in automated production, can be used. Z-transformation application allows reflecting the basic operations of digital signal processing: delay for a certain number of cycles, the multiplication of signal samples to weights and addition.

Key words: *monitoring, diagnosis, management, grinding, Z-transformation.*

Постановка проблемы. В современных шлифовальных станках с ЧПУ функции регулятора или корректирующего устройства выполняет ЭВМ. Они имеют решающее значение в управлении технологическими процессами, в которых совместная работа ЭВМ и исполнительного устройства обеспечивает выполнение ответственных операций. Это в свою очередь требует математического описания системы мониторинга операции шлифования на основе анализа скоро-

стных параметров изменения выходных переменных.

Анализ литературы. Компьютерные системы управления нашли широкое применение в промышленности. За последние десять лет быстродействие и производительность компьютеров, входящих в состав систем управления, используемых в промышленности, значительно выросло. Стоимость компьютеров и логических элементов, входящих в их состав, уменьшилось по экспоненте. Это позволило автоматизировать многие производственные процессы, используя ЭВМ непосредственно в системе управления.

При применении цифровых систем управления имеется ряд преимуществ:

- повышенная точность измерений;
- использование цифровых сигналов (кодов), датчиков, преобразователей, и микропроцессоров;
- меньшая чувствительность к шумам и помехам;
- возможность легко менять алгоритм управления в программном обеспечении.

Использование цифровых сигналов дает возможность использовать большое количество цифровых устройств и коммуникаций, которые способны эффективно измерять, передавать сигналы и связывать между собой различные системы.

Анализ экспериментальных данных, выполненный в работе [1], показывает, что изменения каждого параметра технологической системы имеют свои частотные, скоростные и временные характеристики. Они не образуют непрерывного спектра и достаточно хорошо различимы при наличии контроля динамики выходных переменных операций шлифования.

Имея данные по динамике выходных переменных, всегда возможно определить вид возмущения и изменения технической системы и ввести коррекцию в управление процессом обработки, а также рассчитать интервалы времени, через которые необходимо учитывать те или иные изменения технологической системы.

Поскольку рассматриваемый нами процесс шлифования имеет четко выраженные периоды квантования, рассмотренные согласно работе [2], необходимо предложить метод математического описания и анализа системы мониторинга и управления.

Цель статьи – разработка методики математического описания и анализа системы мониторинга процесса шлифования на основе анализа скоростных параметров изменения выходных переменных.

Изложение основного материала. Процессу шлифования свойственны как признаки дискретных, так и непрерывных систем. Существует мощный, хорошо изученный математический аппарат, построенный на базе преобразования Лапласа для непрерывных систем. Но применение этого преобразования к дискретным системам невозможно.

Для анализа технологической системы процесса шлифования можно использовать метод *Z*-преобразования передаточной функции [3], что позволит достаточно просто определить характеристики системы управления, в которой функции регулятора или корректирующего устройства выполняет ЭВМ. На рис. 1 приведена функциональная схема цифровой системы мониторинга и управления круглошлифовального станка с коррекцией цикла.

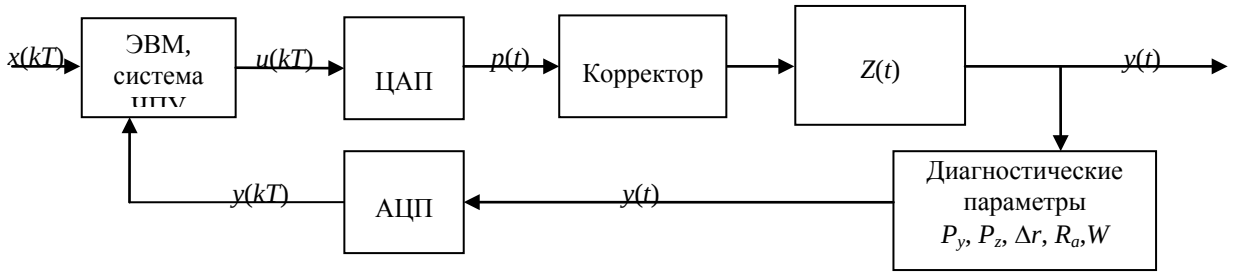


Рис. 1. Функциональная схема цифровой системы мониторинга и управления круглошлифовального станка с коррекцией цикла.

В цифровой системе управления ЭВМ получает и обрабатывает сигнал в цифровом (численном) виде, а не в виде непрерывной переменной. Преобразование непрерывного выходного аналогового сигнала $y(t)$, полученного от диагностических датчиков, осуществляет аналого-цифровой преобразователь (АЦП). Выходной дискретный управляющий сигнал $u(kT)$ от компьютера (цифровой) преобразуется в непрерывный аналоговый сигнал $p(t)$ с помощью цифроаналогового преобразователя (ЦАП). Переменные $x(kT)$, $y(kT)$ и $u(kT)$ являются дискретными сигналами, а $y(t)$ и $p(t)$ – непрерывными функциями времени.

Дадим математическое описание процесса цифровой обработки сигналов, основанного на представлении их в виде функции дискретного времени:

$$y(0), y(1), y(2), y(3), \ldots\ldots y(k), \qquad (1)$$

где индексы 0, 1, 2, 3, … k имеют смысл текущего времени.

Если указать значение периода квантования T непрерывного выходного сигнала $y(t)$, то устанавливается однозначная связь между этим сигналом и числовой последовательностью. При этом каждое число последовательности $y(k)$ равно значению непрерывного сигнала в момент времени $t = kT$:

$$y(t) = y(kT). \qquad (2)$$

Это равенство показывает, что одной и той же последовательности $y(k)$ соответствуют различные непрерывные сигналы, отличающиеся только масштабом по оси времени.

Поскольку выходной квантованный сигнал $y^*(t)$ представляет собой последовательность импульсов с амплитудами $y(kT)$, то его можно описать выражением

$$y^*(t) = \sum_{k=0}^{\infty} y(kT)\delta(t - kT), \qquad (3)$$

где $y(t)$ существует для $t > 0$.

Преобразовав по Лапласу выражение (3), получим:

$$L\{y^*(t)\} = \sum_{k=0}^{\infty} y(kT)e^{-ksT} \qquad (4)$$

Это выражение представляет собой бесконечный ряд по степеням члена e^{sT}.

Введем комплексную переменную

$$z = e^{sT}, \qquad (5)$$

которая осуществляет конформное отображение с s-плоскости на z-плоскость.

Тогда можем определить новое преобразование, называемое Z-преобразованием:

$$Z\{y(t)\} = Z\{y^*(t)\} = \sum_{k=0}^{\infty} y(kT)z^{-k}. \qquad (6)$$

В общем случае будем определять Z-преобразование функции как

$$Z\{y(t)\} = Y(z) = \sum_{k=0}^{\infty} y(kT)z^{-k}. \qquad (7)$$

Из выражения (7) следует, что при помощи Z-преобразования мы получили из дискретной последовательности $y(kT)$ непрерывную функцию $Y(z)$. При этом $Y(z)$ – это не просто функция, а функция комплексного переменного. То есть $Y(z)$ определена на комплексной плоскости z, и значения $Y(z)$ – тоже комплексные величины.

Данное преобразование называется прямым. Существует и обратное Z-преобразование, когда из функции комплексного переменного $Y(z)$ может быть получена исходная последовательность $y(kT)$.

Прямое и обратное Z-преобразование:

$$\begin{aligned} Z\{y(t)\} &= Y(z), \\ y(t) &= Z^{-1}\{Y(z)\}. \end{aligned} \qquad (8)$$

Z-преобразование позволяет отразить основные операции цифровой обработки сигналов: задержки на определенное число тактов, умножения отсчетов сигнала на весовые коэффициенты и сложения.

Для дальнейшего анализа сигналов и дискретных цепей рассмотрим важные свойства Z-преобразования.

Свойство линейности. Если последовательности $x(n)$ соответствует Z-преобразование $X(z)$, а последовательности $y(n)$ соответствует Z-преобразование $Y(z)$:

$$\begin{aligned} x(n) &\leftrightarrow X(z) \\ y(n) &\leftrightarrow Y(z) \end{aligned}, \qquad (9)$$

то суперпозиции этих последовательностей соответствует суперпозиция их Z-преобразований:

$$ax(n) + by(n) \leftrightarrow aX(z) + bY(z), \qquad (10)$$

где a и b – матрицы коэффициентов.

Свойство задержки сигнала на целое число периодов дискретизации. Если последовательности $x(n)$ соответствует Z-преобразование $X(z)$, то такой же последовательности, но сдвинутой на k отсчетов в сторону запаздывания соответствует Z-преобразование $z^{-k}X(z)$:

$$x(n-k) \leftrightarrow z^{-k}X(z). \qquad (11)$$

Следовательно, задержка последовательности приводит к умножению ее Z-преобразования на z^{-k}.

Свойство свертки последовательностей – эквивалент интеграла наложения для аналоговых цепей. Если последовательности $x(n)$ соответствует Z-преобразование $X(z)$, а последовательности $y(n)$ соответствует Z-преобразование $Y(z)$, то дискретной свертке последовательностей $x(n)$ и $y(n)$ соответствует произведение их Z-преобразований:

$$x(n) \times y(n) \leftrightarrow X(z)Y(z). \qquad (12)$$

Выводы. В современных шлифовальных станках с ЧПУ система управления имеет несколько подсистем регулирования, необходимых для обеспечения требуемой точности и качества обработки. Подсистемы шлифовального станка и процесса шлифования имеют различные периоды квантования, по этому при построении цифровых систем мониторинга и управления возникает задача определения частоты квантования каждой из имеющихся подсистем.

Применение математического аппарата теории дискретных систем Z-преобразования позволяет решить задачи анализа устойчивости и качества систем мониторинга и управления процессом шлифования.

За период квантования ЭВМ способна выполнить большое количество вычислений и сформировать выходной сигнал системе управления, который затем используется корректирующим устройством для управления процессом шлифования.

ЛИТЕРАТУРА

1. Новоселов Ю. К. Диагностика операций чистового шлифования по динамике изменения выходных переменных и параметров состояния технологической системы / Ю. К. Новоселов, Э. Э. Ягьяев, Н. Р. Кириенко // Вестник Севастопольского национального технического университета : сборник научных трудов. Вып. 107. – Севастополь, 2010. – С. 170–173.
2. Ту Ю. Современная теория управления / Ю. Ту. – М. : Машиностроение, 1971. – 472 с.
3. Дорф Р. Современные системы управления / Р. Дорф, Р. Бишоп ; [пер. с англ. Б. И. Копылова]. – М. : Лаборатория базовых знаний, 2002. – 832 с.

УДК 519.25

Долгин В. П., Владецкая Е. А., Братан С. М.

РЕАКЦИЯ ДИНАМИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ НА ПРОИЗВОЛЬНЫЙ СИГНАЛ

Аннотация. *Предложен метод вычисления реакции динамической системы на входной сигнал, изменяющийся во времени по произвольному закону, включая сигналы, имеющие широкий спектр, в том числе полигармонические со случайными фазами и амплитудами. Изложена методика численной реализации метода. Приведен пример вычисления выходного сигнала по заданной передаточной функции системы на входной сигнал со случайным характером изменения уровня в случайные моменты времени. Рассмотрены особенности уменьшения внешних воздействий на технологическую систему шлифовального станка в условиях плавучей ремонтной мастерской путем использования демпфирующего устройства – виброизолирующей опоры новой конструкции.*

Ключевые слова: *динамическая система, критерий, дисперсия, статистическая погрешность, качество, шлифовальный станок, плавучая ремонтная мастерская.*

Долгін В. П., Владецька О. А., Братан С. М.

РЕАКЦІЯ ДИНАМІЧНОЇ СИСТЕМИ НА ДОВІЛЬНИЙ СИГНАЛ

Анотація. *Запропонований метод обчислення реакції динамічної системи на вхідний сигнал, що змінюється в часі за довільним законом, включаючи сигнали, що мають широкий спектр, у тому числі полігармонічні з випадковими фазами і амплітудами. Викладена методика чисельної реалізації методу. Наведений приклад обчислення вихідного сигналу по заданій передатній функції системи на вхідний сигнал з випадковим характером зміни рівня у випадкові моменти часу. Розглянуті особливості зменшення зовнішніх дій на технологічну систему шліфувального верстата в умовах плавучої ремонтної майстерні шляхом використання демпфуючого облаштування – віброізолюючої опори нової конструкції.*

Ключові слова: *динамічна система, критерій, дисперсія, статистична погрішність, якість, шліфувальний верстат, плавуча ремонтна майстерня*

Dolgin V. P., Vladetskaya E. A., Bratan S. M.

DYNAMIC SYSTEM REACTION TO AN ARBITRARY SIGNAL

Summary. *A method for calculating the dynamic response of the system to an input signal which varies according to random acts, including signals having a wide range including polyharmonic with random phases and amplitudes is offered. The technique of numerical implementation of the method was proposed. An example of the calculation of the output signal for a given transfer function to the input signal from the random nature of the level in random periods of time is proposed. The features of reducing the external affect on technological system of polishing machine-tool in the conditions of floating repair shop by the use of snubber – vibroinsulating support of new construction are considered.*

Emerging challenges associated with vibration resistance of such technical facilities like machines, operating under a floating repair shop, automotive systems require new approaches to the modeling of reactions of their dynamical systems on arbitrary waveforms. The purpose of this paper is to obtain a numerical procedure for evaluating response of linear systems with lumped parameters for arbitrary waveform without converting input. This affords an opportunity to calculate the response of the system to an arbitrary input signal without converting its procedures. The error obtained at numerical solution depends on the quantization step size. Damping factor to evaluate the quality of the suspension and the effect of input offset parameters is introduced.

Key words: *dynamical system, the criteria, variance, the error of statistical quality, polishing machine-tool, floating repair shop.*

Постановка проблемы. Анализ реакции динамических систем на сигнал произвольной формы представляет собой особую задачу. Ее решение возможно путем разложения сигнала и представления его в полигармонической форме. При этом возникает проблема определения требуемого числа гармонических составляющих и вычисления значений их амплитуд, что осложняет решение задачи и приводит к появлению погрешности. Возможен рекуррентный метод [1] анализа реакции динамической системы по ее операторной передаточной функции, исключающий процедуру преобразования сигнала.

Анализ последних исследований и публикаций. Вопросам исследования реакции динамической системы на внешние воздействия посвящено большое количество работ, накоплен справочный материал, в частности по защите технических объектов от вибраций и ударов [2]. Разработан математический аппарат для автоматического управления различными техническими и технологическими объектами и системами, позволяющий использовать численные методы анализа и синтеза систем и объектов в конкретных примерах [3].

Однако возникающие новые задачи, связанные с виброустойчивостью таких технических объектов, как станки, работающие в условиях плавучей ремонтной мастерской, автомобильные системы, требуют новых подходов к моделированию реакций их динамических систем на сигналы произвольной формы.

Цель статьи состоит в получении численной процедуры вычисления реакции линейной системы с сосредоточенными параметрами на сигнал произвольной формы без преобразования входного сигнала.

Изложение основного материала. Рассмотрим процедуру получения решения в обобщенной форме. Для входного сигнала X звена с операторной передаточной функцией $W(p)=\dfrac{C(p)}{Z(p)}$, где $C(p)=b_0+b_1p+b_2p^2+\cdots+b_mp^m$ – оператор воздействия, $Z(p)=a_0+a_1p+a_2p^2+\cdots+a_np^n$ – собственный оператор, p – оператор Лапласа, допустимо описание связи входного X и выходного Y сигналов в форме

$$X\left(b_0+b_1p+b_2p^2+\cdots+b_mp^m\right).\qquad(1)$$
$$Y\left(a_0+a_1p+a_2p^2+\cdots+a_np^n\right)$$

Задача состоит в получении решения уравнения (1) относительно выходного сигнала Y при известном входном сигнале X, коэффициентах $b_0,\cdots,b_m$ и $a_0,\cdots,a_n$. Запишем одно из возможных решений уравнения (1) в операторной форме:

$$Y=\frac{Xb_0-Ya_0}{a_np^n}+\frac{Xb_1-Ya_1}{a_np^{n-1}}+\cdots+\frac{Xb_m-Ya_m}{a_np^{n-m}}-\frac{Ya_{m-1}}{a_np^{n-m-1}}-\cdots-\frac{Ya_{n-1}}{a_np};\ n>m.\qquad(2)$$

Для получения решения во временной области необходимо выполнить интегрирование, так как p^{-q} означает q – кратное интегрирование слагаемых, содержащих $q = 1,\cdots, n$.

С этой целью уравнение (2) представим в тождественной форме:

$$Y=a_n^{-1}\begin{pmatrix}p^{-n}\left(Xb_0-Ya_0\right)+p^{1-n}\left(Xb_1-Ya_1\right)+\cdots+\\+p^{m-n}\left(Xb_m-Ya_m\right)-p^{1+m-n}Ya_{m-1}-\cdots-p^{-1}Ya_{n-1}\end{pmatrix};\ n>m.$$

Выполняя последовательно интегрирование с некоторым шагом по времени h, найдем дискретные значения выходного сигнала $Y(t)$ для значений $t=0,h,2h,\cdots,zh$, где z – число значений, на которые разбит временной интервал.

Пример 1. На рис. 1 изображена кинематическая схема звена второго порядка, которая может быть применена при моделировании технологических процессов, динамических систем станков, автомобилей, систем виброизоляции и др.

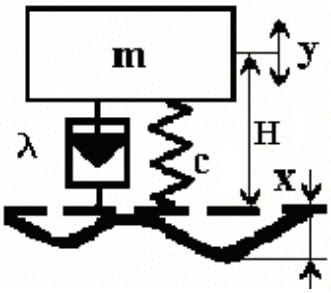


Рис. 1. Кинематическая схема.

Динамическая система, изображенная на рис. 1, имеет следующие обозначения: m – масса, кг; c – жесткость, Н/м; л – сопротивление потерь, Нс/м; y – изменение положения центра тяжести, м; H – положение центра тяжести, м.

На основании изложенной методики представим процедуру преобразования дифференциального уравнения системы.

Запишем дифференциальное уравнение с учетом введенных обозначений в виде

$$my'' + лy' + cy = kx;$$

$$y''=\frac{\partial^2}{\partial t^2}y;\ y'=\frac{\partial}{\partial t}y;$$

$$m\left(\frac{\partial^2}{\partial t^2}y\right)+\lambda\left(\frac{\partial}{\partial t}y\right)+cy=kx.$$

Сведем к операторной форме полученное выражение, учтя связь производной с дифференциалом и введя символ (оператор) дифференцирования p:

$$py = \frac{\partial}{\partial t} y \,;\; p^2 y = \frac{\partial^2}{\partial t^2} y \,;$$

$$mp^2 y + лpy + cy = kx.$$

Перейдем к стандартной (безразмерной) форме:

$$a_2 = m / c \,;\; a_1 = л / c \,;\; k / c = 1;$$

$$a_2 p_2 y + a_1 py + y = x. \qquad (3)$$

Разделив переменные x и y

$$y\left(a_2 p^2 + a_1 p + 1\right) = x \,,$$

получим операторную передаточную функцию

$$W_1(p) = \frac{1}{a_2 p^2 + a_1 p + 1} \,,$$

по которой для сравнения можно вычислить реакцию на стандартный сигнал.

Получим решение уравнения (3) в рекурсивной форме:

$$mp^2 y = c(x - y) - лpy;$$

$$y = c(x - y)/mp^2 - лy/mp;$$

$$y = (c(x - y)/p - лy)/mp.$$

Выполним интегрирование по методу Эйлера:

$$y = y + c(x - Y)\, h;$$

$$Y = Y + (y - лY)\, h/m. \qquad (4)$$

Перейдем к рекуррентной форме:

$$y[i] = y[i - 1] + c(x[i] - Y[i - 1])\, h;$$

$$Y[i] = Y[i - 1] + (y[i] - лY[i - 1])\, h/m, \qquad (5)$$

где $i = 1,\cdots, z$.

Одно из полученных решений (4) и (5) либо их комбинация могут быть применены для вычисления реакции системы на произвольный дискретно заданный входной сигнал.

Пример 2. Имитационная модель. Для иллюстрации результатов анализа реакции системы подвески автомобиля в качестве примера выбраны параметры автомобиля ВАЗ-2101:
масса автомобиля – $M_a = 950$ кг;
грузоподъемность – $M_g = 300$ кг;
коэффициент загрузки – $K_z = 0{,}5$;
приведенная масса – $m = (M_a + M_g \times K_z)/4$ кг;
осадка под нагрузкой – $D_h = 0{,}169$ м;
жесткость рессоры – $c = 4353$ Н/м;
коэффициент демпфирования – $x_i = 0{,}5$;
сопротивление амортизаторов – $L = 1094$ Нс/м;
положение кузова – $H = 0{,}35$ м;
максимальная величина неровностей – $D = 9$ Н/м.

Задав временной интервал t_0 и число реализаций z, найдем шаг дискретизации по времени h. При известном значении h по формуле (5) вычислим значения $Y_i = Y(t_i)$, где $t_i = ih$; $i = 0,\cdots, z$. Для заданных моментов времени t_i получим значения $X_i = X(t_i)$, что позволяет построить графики входного воздействия $X(t)$ и реакции подвески $Y(t)$.

На рис. 2 изображены графики рельефа поверхности дорожного покрытия $X(t)$ и реакции подвески $Y(t)$ при номинальных параметрах.

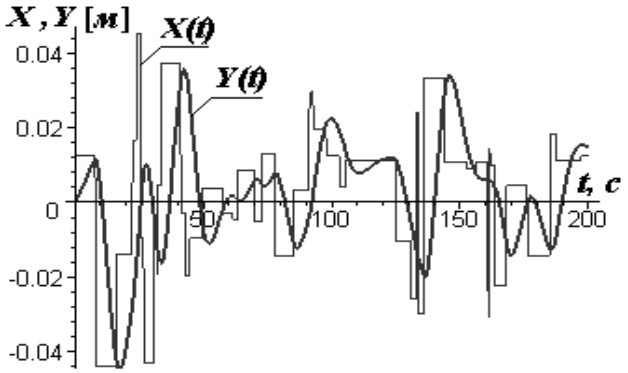


Рис. 2. Реакция системы при номинальных параметрах.

На рис. 3 изображены графики рельефа поверхности дорожного покрытия $X(t)$, реакции подвески при номинальных параметрах $Y(t)$ и при уменьшении c $Yc(t)$.

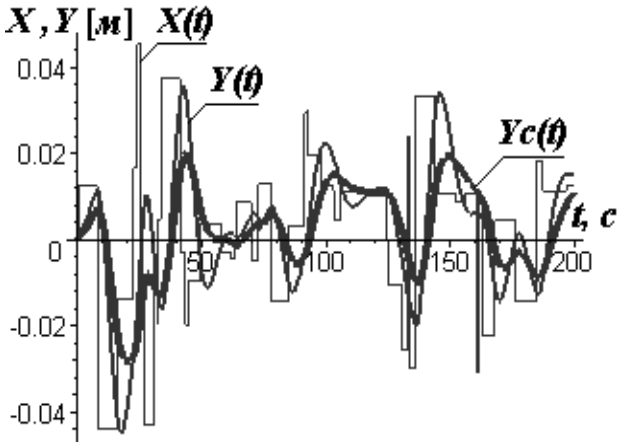


Рис. 3. Реакция системы при уменьшении *c*.

На рис. 4 изображены графики рельефа поверхности дорожного покрытия $X(t)$, реакции подвески при номинальных параметрах $Y(t)$ и при уменьшении m $Ym(t)$.

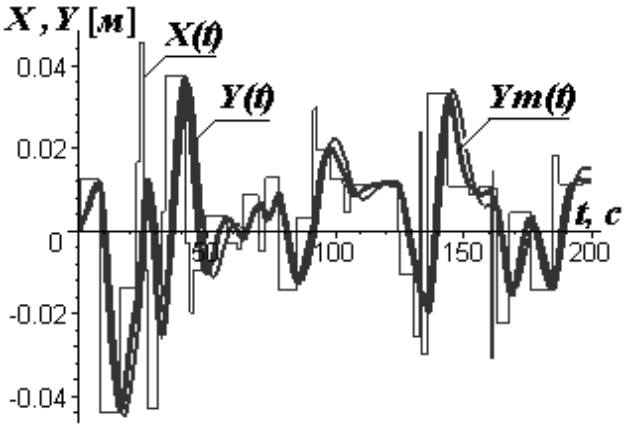


Рис. 4. Реакция системы при уменьшении *m*.

На рис. 5 изображены графики рельефа поверхности дорожного покрытия $X(t)$, реакции подвески при номинальных параметрах $Y(t)$ и при увеличении λ $Y\lambda(t)$.

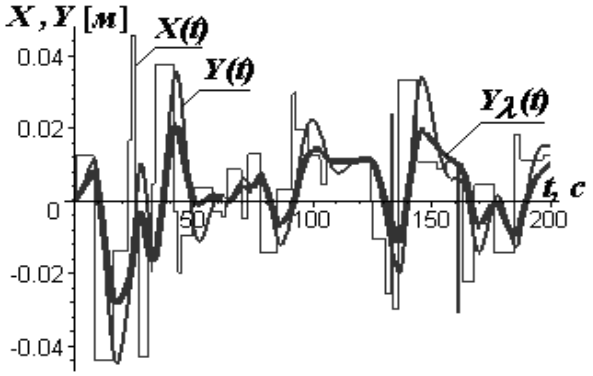


Рис. 5. Реакция системы при увеличении λ.

Оценка влияния параметров. При анализе влияния параметров на свойства подвески, находящейся под воздействием случайных возмущений, связанных с неровностями покрытия, уместен статистический подход сравнения статистических характеристик входного сигнала, обусловленного случайными изменениями рельефа покрытия, с выходным сигналом, характеризующим изменение положения центра тяжести приведенной массы. В зависимости от цели анализа такими характеристиками могут быть начальные и центральные моменты *k*-го порядка. Наиболее приемлемыми для анализа качества работы подвески является дисперсия или стандартное отклонение в качестве меры оценки степени влияния на качество работы подвески значений ее параметров.

Сравнивая, например, дисперсии входного воздействия $D(X)$ и реакции подвески $D(Y)$, можно судить о качестве работы подвески. Введем коэффициент демпфирования $K = D(X)/D(Y)$, который отражает степень демпфирования. Его величина будет расти по мере снижения $D(Y)$. Для вычисления дисперсии применен программный пакет Maple.

Dx:=describe[variance]([seq(X[i],i=1..z)]):
для вычисления дисперсии входного воздействия.
Dy:=describe[variance]([seq(Y[i],i=1..z)]):
для вычисления дисперсии реакции подвески.

В результате вычислений получены следующие значения коэффициентов демпфирования:
K_n = 1,63 для номинальных параметров подвески;
K_c = 3,27 при уменьшении жесткости c в два раза;
K_m = 1,74 при уменьшении приведенной массы подвески m в два раза;
K_λ = 3,38 при увеличении сопротивления амортизаторов подвески λ в два раза.

Пример 3. Рассмотрим пример моделирования технологической системы плоскошлифовального станка модели 3Г71М, оснащенного демпфирующим устройством (рис. 6) [4] с такими параметрами:
масса системы – M_a = 3450 кг;
масса детали (заготовки) – M_g = 30 кг;
коэффициент загрузки – K_z = 0,5;
приведенная масса – $m_0 = M_a + M_g \times K_z$ кг;
жесткость системы – c_0 = 500 Н/м;
сопротивление потерь – L_0 = 1000 Нс/м;
максимальное значение шумовой составляющей – D_x = 0,035 м.

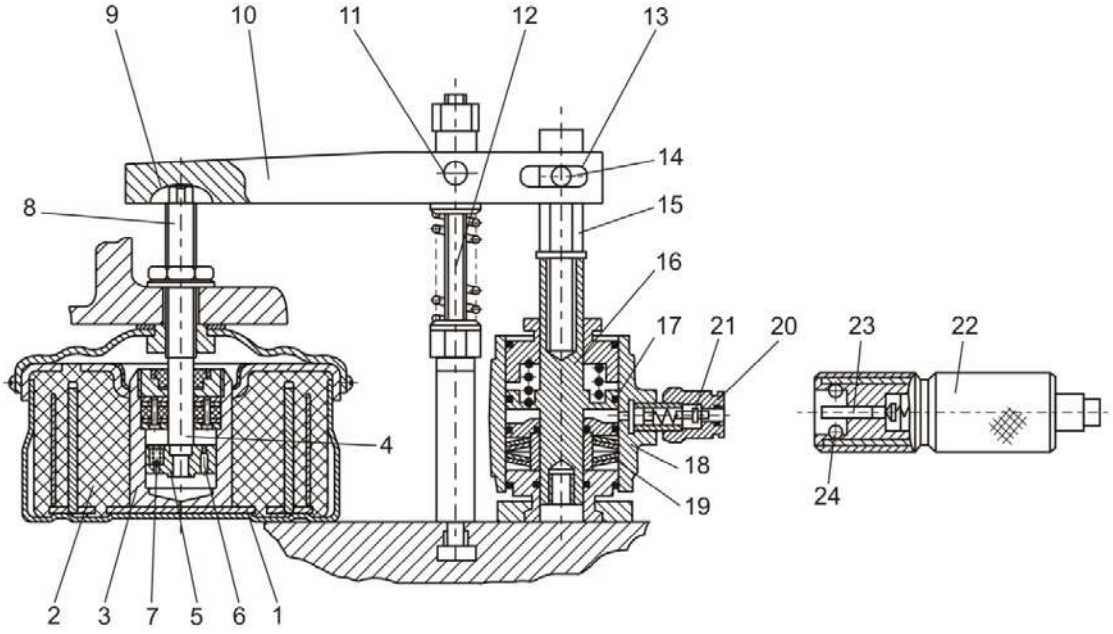


Рис. 6. Общий вид демпфирующего устройства плоскошлифовального станка:
1 – основание; 2 – резиновый элементом; 3 – цилиндр; 4 – шток; 5 – поршень; 6 – калиброванное отверстие; 7 – клапан сжатия; 8 – регулировочный винта; 9 – сферическая поверхность лунки; 10 – прихват; 11 – ось; 12 – стойка; 13 – продольный паз; 14 – ось; 15 – опора; 16 – опорный шток; 17 – поршень; 18 – гидроцилиндр; 19 – пружинный аккумулятор; 20 – малая полумуфта; 21 – клапан; 22 – большая полумуфта; 23 – клапанный штырь; 24 – шарики.

На рис. 7 изображены графики помехи $X(t)$, действующей на систему, и результат демпфирования $Y(t)$ при номинальных параметрах. На рис. 7*б* наложен график результата демпфирования $Yc(t)$ при $c = c/2$.

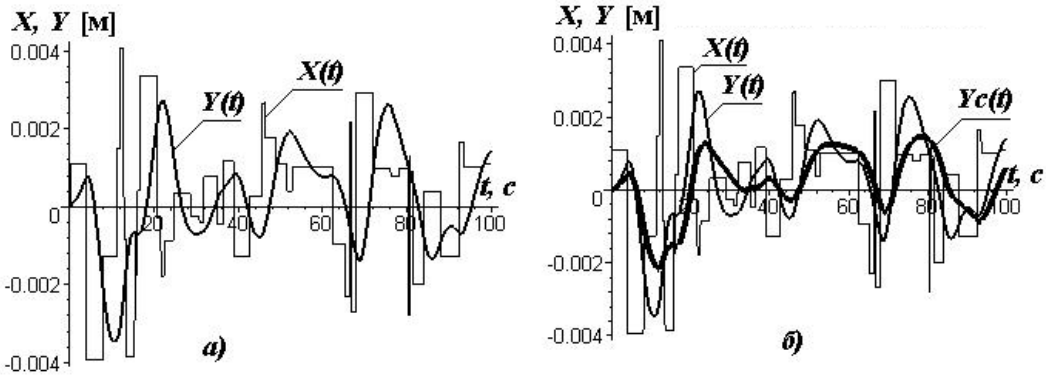


Рис. 7. Графики реакции системы при: а) номинальных параметрах системы; б) значении $c = c/2$.

Для оценки влияния изменения параметров технологической системы на рис. 8 приведены графики реакции системы при изменениях остальных параметров $m = m/2$ и $\lambda = 2\lambda$.

В результате вычислений получены следующие значения коэффициентов демпфирования:

K_n = 1,78 для номинальных параметров подвески;
K_c = 3,75 при уменьшении жесткости c в два раза;
K_m = 1,86 при уменьшении приведенной массы подвески m в два раза;
K_λ = 3,79 при увеличении сопротивления амортизаторов подвески л в два раза.

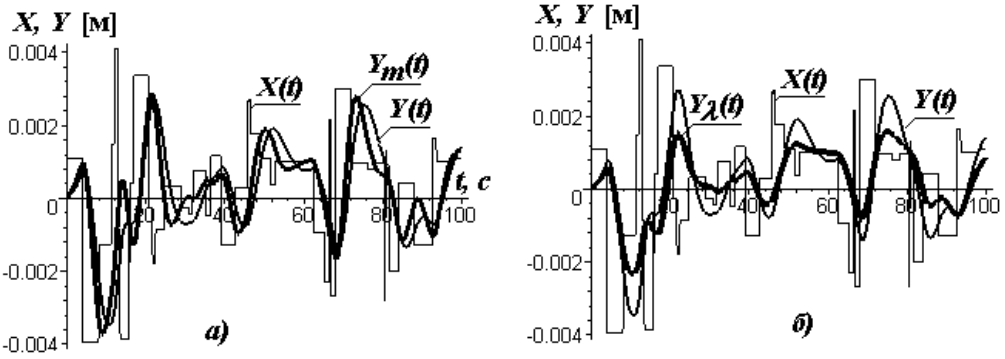


Рис. 8. Графики реакции системы при: а) значении $m = m/2$; б) значении $\lambda = 2\lambda$.

Оценка погрешности дискретного преобразования. Для оценки величины погрешности дискретного преобразования передаточная функция системы приведена к стандартной форме $W_2(p) = \dfrac{1}{a_0 + a_1 p + a_2 p^2}$, где $a_0 = 1$; $a_1 = \lambda/c$; $a_2 = m/c$.

На рис. 9*а* изображены графики переходных характеристик, где $Y(t)$ – переходная характеристика, вычисленная в результате дискретного представления, а $y(p)$ – переходная характеристика, полученная в результате обратного преобразования Лапласа. На рис. 9*б* изображены графики погрешности $Eps(t) = Y(t) - y(t)$, где кривая 1 получена при шаге дискретизации в два раза больше шага дискретизации, соответствующего кривой 2.

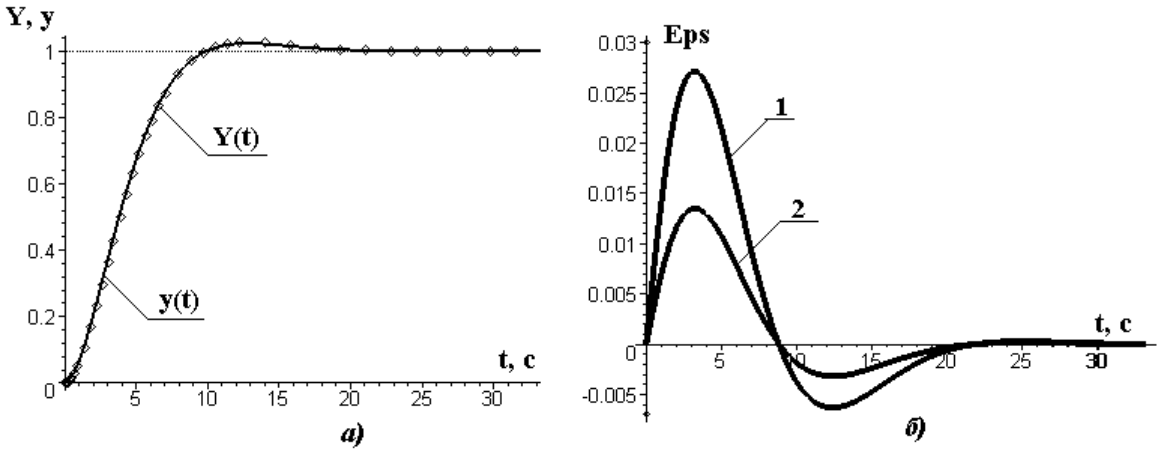


Рис. 9. Графики переходных характеристик.

Выводы. Рассмотренный метод позволяет вычислить реакцию системы на произвольный входной сигнал без процедур его преобразования.

Погрешность полученного численного решения зависит от величины шага квантования.

Введенный коэффициент демпфирования позволяет оценить качество работы подвески и эффект от ввода коррекции ее параметров.

ЛИТЕРАТУРА

1. Бесекерский В. А. Теория систем автоматического управления / В. А. Бесекерский, Е. П. Попов. – СПб. : Профессия, 2003. – 744 с.
2. Вибрации в технике : справочник : в 6-ти т. / под ред. К. В. Фролова. – М. : Машиностроение, 1981. – Т. 6. Защита от вибраций и ударов. – 456 с.
3. Долгин В. П. Автоматическое управление техническими и технологическими объектами и системами. Численные методы анализа и синтеза систем и объектов / В. П. Долгин. – Севастополь : СевНТУ, 2003. – 320 с.
4. Пат. № 51621 Україна, МПК B 23 Q 1/00. Віброізолюючий пристрій металорізального верстата плавучої ремонтної майстерні / О. О. Харченко, К. О. Владецька, С. М. Братан, Д. О. Владецький ; заявник та патентовласник Севастопольський національний технічний університет. – № 201000394 ; заявл. 18.01.2010 ; опубл. 26.07.2010. Бюл. № 14.

УДК 621.9-219.1-751

Братан С. М., Владецкая Е. А., Харченко А. О.

ПОВЫШЕНИЕ КАЧЕСТВА ОБРАБОТКИ ПРИ ШЛИФОВАНИИ В УСЛОВИЯХ МЕХАНООБРАБАТЫВАЮЩИХ УЧАСТКОВ ПЛАВУЧИХ РЕМОНТНЫХ МАСТЕРСКИХ

Аннотация. *Рассмотрены особенности эксплуатации шлифовальных станков плавучей ремонтной мастерской при наличии динамических воздействий на технологическую систему изменяющихся внешних факторов как от окружающей среды, так и от внешнего оборудования. Предложена методика поиска оптимальной структуры системы виброизолирующего устройства станка на основе системного подхода, в частности, метода морфологического анализа и синтеза технических решений. Приведены результаты теоретических и экспериментальных исследований, которые легли в основу новой конструкции виброизолирующих опор шлифовального станка, позволившей повысить качество обработки при плоском шлифовании за счет повышения виброустойчивости.*

Ключевые слова: *шлифовальный станок, плавучая ремонтная мастерская, виброизолирующая опора, морфологический анализ, качество обработки.*

Братан С. М., Владецька О. О., Харченко О. О.

ПІДВИЩЕННЯ ЯКОСТІ ОБРОБКИ ПРИ ШЛІФУВАННІ В УМОВАХ МЕХАНООБРОБНИХ ДІЛЯНОК ПЛАВУЧИХ РЕМОНТНИХ МАЙСТЕРЕНЬ

Анотація. *Розглянуто особливості експлуатації шліфувальних верстатів плавучої ремонтної майстерні при наявності динамічних впливів на технологічну систему змінних зовнішніх факторів як від навколишнього середовища, так і від зовнішнього обладнання. Запропоновано методику пошуку оптимальної структури системи віброізоляційного пристрою верстата на основі системного підходу, а саме, методу морфологічного аналізу та синтезу технічних рішень. Наведені результати теоретичних та експериментальних досліджень, що лягли в основу нової конструкції віброізоляційних опор шліфувального верстату, яка дозволила підвищити якість обробки при плоскому шліфуванні за рахунок підвищення вібростійкості.*

Ключові слова: *шліфувальний верстат, плавуча ремонтна майстерня, віброізоляційна опора, морфологічний аналіз, якість обробки.*

Bratan S. M., Vladetskaya E. A., Harchenko A. O.

IMPROVEMENT OF GRINDING QUALITY FOR MECHANICAL PROCESSING ON FLOATING REPAIR SHOPS

Summary. *The article describes the features of grinding machines operating in a floating repair shop together with impact of external equipment and the environment on their technological system. New methods of finding the optimal structure of the machine vibration-isolating device system on the basis of systematic approach, in particular based on morphological analysis and synthesis of technical solutions are proposed. The presented results of theoretical and experimental studies have improved the quality of processing by reducing*

vibration effects on the technological system by means of improving the vibroisolation of grinding machines, equipped by vibroisolating mounts of new design.

Key words: *grinding machine, floating repair shop, vibroisolating mount, morphological analysis, quality of processing.*

Постановка проблемы. При ремонте морских и речных транспортных средств широкое применение находят такие передвижные механические комплексы, как плавучие ремонтные мастерские (ПРМ), на палубах которых размещены различные участки, в том числе и механообрабатывающие, включающие практически все виды станочного оборудования. Особенностью эксплуатации указанного оборудования является наличие вибраций, вызванных действием различных источников, приводящее к снижению точности и чистоты обработки, а также и к другим нарушениям технологических процессов. Наличие колебаний в отклонениях расположения шероховатости поверхности, объясняются возмущающими воздействиями в технологических процессах, нестабильностью технологической системы за счет изменения внешних факторов, часть из которых не контролируется в процессе обработки. Эта проблема особенно актуальна для условий работы такого высокоточного технологического оборудования в ПРМ, как шлифовальные станки.

Анализ литературы. Общая модель формирования технологической системы шлифовального станка представлена на рис. 1.

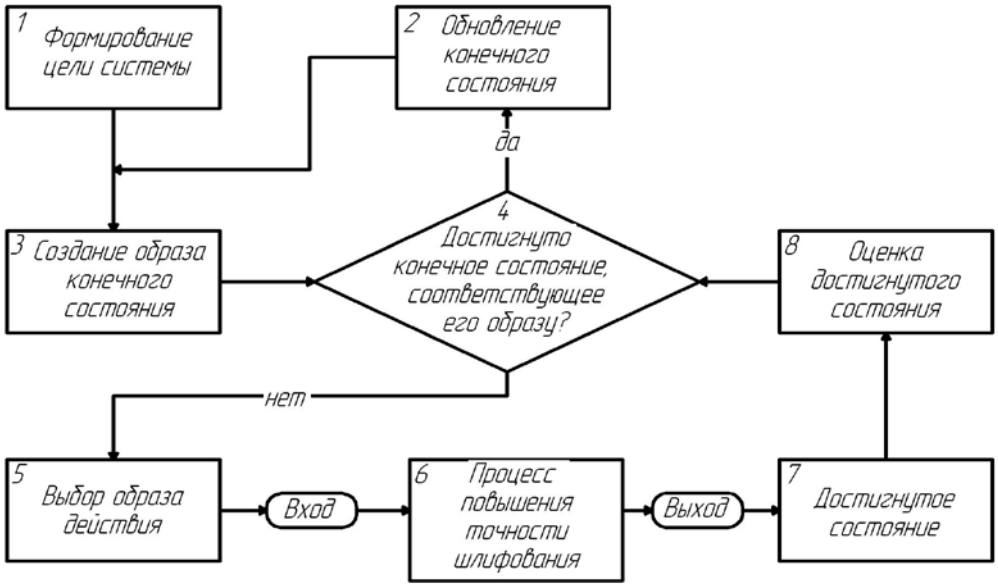


Рис. 1. Общая модель формирования рациональной технологической системы шлифовального станка.

Повышение точности шлифования за счет повышения эффективности виброизоляции станка в условиях ПРМ может быть достигнуто при условии выполнения следующих этапов (рис. 2).

На первом этапе необходимо выполнить анализ вибрационных взаимодействий станка в условиях работы ПРМ [1; 2]; на втором – разработать математическую модель динамической системы станка [3]; на третьем – определить динамические свойства и внешние воздействия от другого оборудования и окружающей среды, передаваемые через поверхность палубы несущей системе станка; на четвертом – выполнить морфологический анализ системы виброизолирующего устройства шлифовального станка; на пятом – провести оценку надежности синтезированных рациональных вариантов виброизолирующих устройств; на шестом – выполнить структурно-параметрическую оптимизацию этих устройств; на седьмом – разработать рекомендации по повышению точности процесса шлифования в условиях ПРМ на основе высокоэффективных виброизолирующих устройств.

При системном анализе динамической системы оборудования ПРМ, кроме воздействий внешнего оборудования (компрессоров, вентиляторов, насосов, транспортно-загрузочных устройств), характерных для работы в стационарных условиях участка (цеха) и создающих гармоническое воздействие на основание с частотой вращения приводных двигателей (f = 12…48,5 $с^{-1}$), и оборудования, создающего импульсное воздействие на основание (прессовые, долбежные и строгальные станки), необходимо учитывать такие воздействия внешней среды, как колебания водной поверхности, передающие вибрационные воздействия через плавучее основание и поверхность палубы на оборудование.

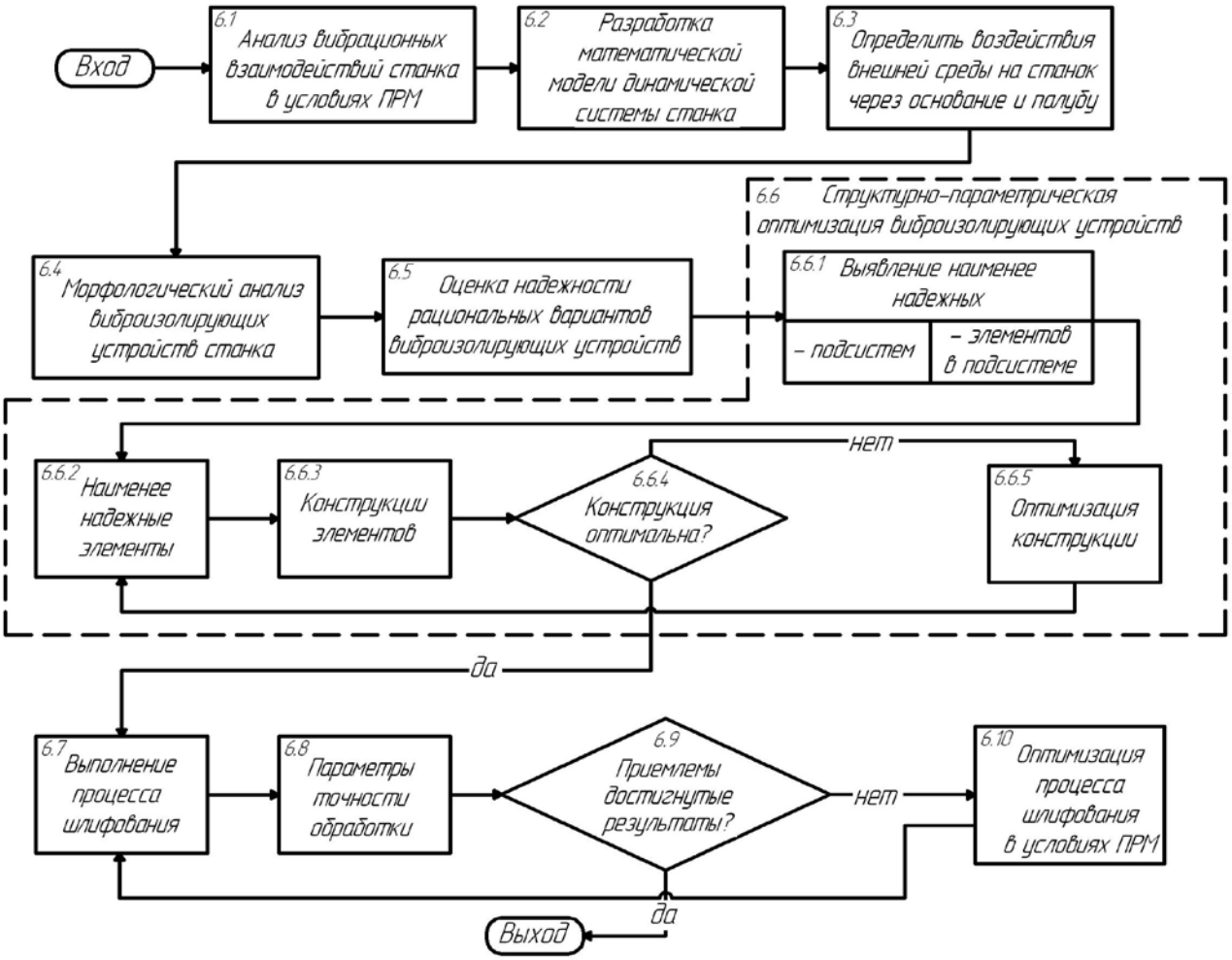


Рис. 2. Алгоритм повышения точности процесса шлифования в условиях ПРМ.

При декомпозиции механической обработки в ПРМ выделяют подсистемы: «Источник колебаний» и подсистема «Объект виброзащиты», которые соединены между собой связями, вызывающими колебания объекта от динамических воздействий. Знакопеременные напряжения, вызванные вибрационными воздействиями, приводят к накоплению повреждений в материале, что вызывает появление усталостных трещин и разрушения. Кроме усталостных разрушений в механических системах наблюдаются такие явления, как ослабление неподвижных соединений, смещение сопряженных поверхностей соединений деталей машин. При этом происходит изменение структуры поверхностных слоев сопрягаемых деталей, их износ и, как результат, уменьшение силы трения в соединении, что вызывает изменение диссипативных свойств объекта, смещает его собственные частоты и т. п.

Так, в системе металлорежущего станка, например, плоскошлифовального, при его работе в результате колебательных процессов (кинетических и силовых) происходят сложные вибрационные воздействия – как стационарные, так и нестационарные. Можно предположить также наличие ударных воздействий – механических кратковременных в результате работы внешнего оборудования одновременно с процессом обработки, а также длительного действия за счет качки при колебаниях водной поверхности, передаваемых плавучим основанием через поверхность палубы технологическому оборудованию.

Период работы оборудования должен обеспечиваться удержанием плавучей ремонтной мастерской в заданном месте в условиях воздействия внешней среды – ветра, течения и морского волнения. В случае прекращения мер по удержанию возмущающие силы могут привести к приостановке работ, аварийным ситуациям и выходу из строя технологического оборудования

Для обеспечения работоспособности оборудования необходимо обеспечивать возможность компенсации колебаний, создаваемых технологическим оборудованием вследствие смещений плавучей ремонтной мастерской в результате внешних возмущений, которые определяются сезонными условиями заданных акваторий. В частности, скорость течения может достигать 1,5 м/с, степень морского волнения – 5–6 баллов, скорость ветра – 25 м/с и более. Стабилизация плавучего основания может быть частично осуществлена с достаточной степенью точности тради-

ционными методами – успокоителями качки (цистернами со свободными поверхностями, расположенными вдоль бортов и сообщающимися между собой через устройства, поглощающие энергию потока перетекающей жидкости; управляемыми или неуправляемыми скуловидными килями или рулями).

На плавучее основание ПРМ воздействуют возмущающие силы ветра, течения и морского волнения. Воздействие ветра может быть оценено путем измерения скорости и направления ветра румбоанемомоментрами, установленными на плавучем основании, или расчетом аэродинамических сил по известным соотношениям, подробно рассмотренным в работе [4].

Проведенный анализ и декомпозиция системы станка позволили выявить подсистемы и связи между ними, вызывающие колебания объекта под действием сил динамических воздействий.

Для определения динамических характеристик несущей системы, а именно амплитудно-частотных и амплитудно-фазовых частотных характеристик, необходимо наличие динамических моделей технологической системы станка, которые строятся на основе конкретной расчетной схемы. Одна из предлагаемых схем [2] позволяет проиллюстрировать динамику перемещений центров круга, заготовки и изменения фактической глубины резания в процессе круглого шлифования.

Повышение качества обработки деталей непосредственно связано с необходимостью ослабления вынужденных колебаний станка, передаваемых через поверхность палубы от внешних источников. Как правило, на палубах плавучих ремонтных мастерских фиксация станков обеспечивается фундаментом, который не обеспечивает достаточного уровня виброизоляции вследствие значительных колебательных воздействий, как от внешнего оборудования, так и от внешней среды через плавучее основание и поверхность палубы.

Целью статьи является разработка методики повышения качества обработки при шлифовании путем снижения уровня вынужденных колебаний станка за счет повышения эффективности виброизоляции его несущей системы на основе исследований процесса обработки в условиях ПРМ и с учетом мероприятий, принимаемых на этапах проектирования.

Изложение основного материала. Для поиска рациональных технических решений по конструкции виброизолирующих устройств станка используем метод морфологического анализа, достаточно полно разработанный для решения технических задач, в частности проектирования станков, их узлов и механизмов [5].

Однако для нашего случая этот метод в чистом виде использовать невозможно из-за очевидных недостатков его последнего этапа – выбора рационального варианта, при котором не учитываются реальные условия функционирования виброизолирующих устройств.

Поэтому морфологический анализ, базирующийся на последовательном переборе возможных вариантов элементов виброизолирующего устройства, принимаем в качестве аппарата на этапе создания рациональной ТС шлифовального станка для формирования множества структур системы виброизолирующего устройства (рис. 3) и оценки этих вариантов по укрупненным показателям. Для этого построим морфологическую матрицу (табл. 1), подробно рассматривая признаки и характеристики подсистем и элементов, а также выявляя связи между ними.

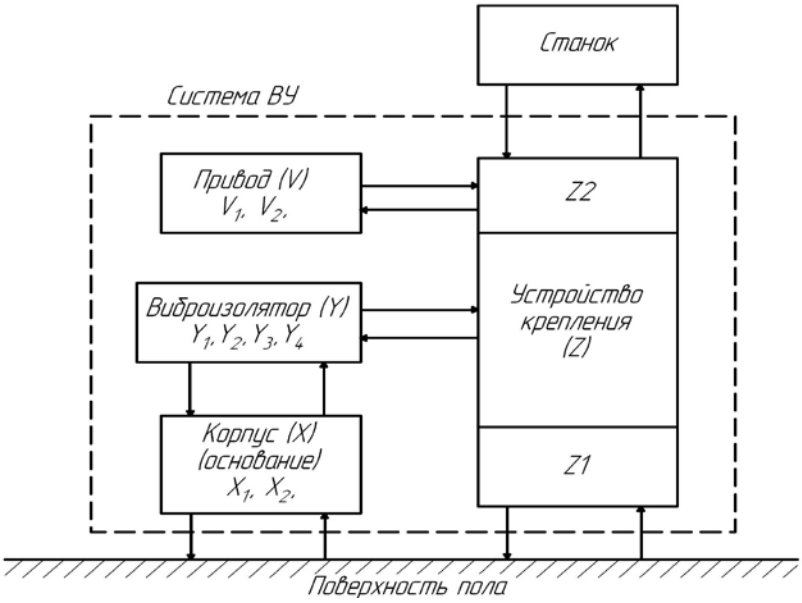


Рис. 3. Структурная схема системы виброизолирующего устройства (ВУ).

Таблица 1.

Морфологическая матрица системы виброизолирующего устройства.

Подсистема	Признаки	Элемент/Свойство
Корпус (*X*) (основание)	X_1. Форма	X_{11} Диск
		X_{12} Цилиндр
		X_{13} Квадрат
		X_{14} Призма
		X_{15} Корпус
		X_{16} Пирамида
		X_{17} Комбинированный
	X_2. Материал	X_{21} Металл
		X_{22} Пластик
		X_{23} Углеволокно
		X_{24} Другие неметаллы
Виброизолятор (*Y*)	Y_1. Материал	Y_{11} Резина
		Y_{12} Капролон
		Y_{13} Полиуретан
		Y_{14} Эластомер
		Y_{15} Металл
		Y_{16} Другие
	Y_2.Форма	Y_{21} Цилиндр
		Y_{22} Тор
		Y_{23} Конус
		Y_{24} Спираль
		Y_{25} Тарелка
		Y_{26} Переменного сечения
		Y_{27} С внутренней полостью
		Y_{28} Усечённой формы
		Y_{29} В виде мембраны
		Y_{210} В виде поршня
		Y_{211} Другие
	Y_3. Рабочее тело	Y_{31} Масло
		Y_{32} Воздух
		Y_{33} Отсутствует
	Y_4. Принцип действия	Y_{41} Растяжение-сжатие материала
		Y_{42} Изгибные деформации
		Y_{43} Перемещение рабочего тела
Устройство крепления (*Z*)	Z_1. К полу	Z_{11} Механическое
		Z_{12} Жёсткая фиксация
		Z_{13} Отсутствует
	Z_2. К станку	Z_{21} Механическое
		Z_{22} Жёсткая фиксация
		Z_{23} Упруго-механическая фиксация
Привод (*V*)	V_1. Вид привода	V_{11} Электромагнитный
		V_{12} Гидравлический
		V_{13} Пневматический
		V_{14} Комбинированный
		V_{15} Ручной
		V_{16} Отсутствует
	V_2. Вид передачи	V_{21} Непосредственно
		V_{22} Рычажной системой
		V_{23} Другие

После заполнения морфологической матрицы перейдем к синтезу вариантов структуры виброизолирующего устройства. Методика поиска оптимальной структуры системы при заданных требованиях состоит в следующем. Вначале из множества признаков n = 1,2,…,N подсистемы «корпус» (*X*), который имеет такие признаки, как форма, материал, выделим наиболее приемлемые элементы для создания виброизолирующего устройства (ВУ).

При синтезе варианта ВУ применимы различные типы перечисленных элементов, которые обеспечат правильное функционирование системы, но имеют различные характеристики (на-

дёжность, габаритные размеры, масса, стоимость).

Обозначение и расшифровка параметров X_{nm}, Y_{kl}, Z_{df}, V_{qw} для виброизолирующего устройства приведены в морфологической матрице, представленной в табл. 1. Характеристики элементов из указанной таблицы выбираем в качестве основы для построения графа на рис. 4, характеризующего множество возможных вариантов подсистем ВУ, которое равно числу путей в графе.

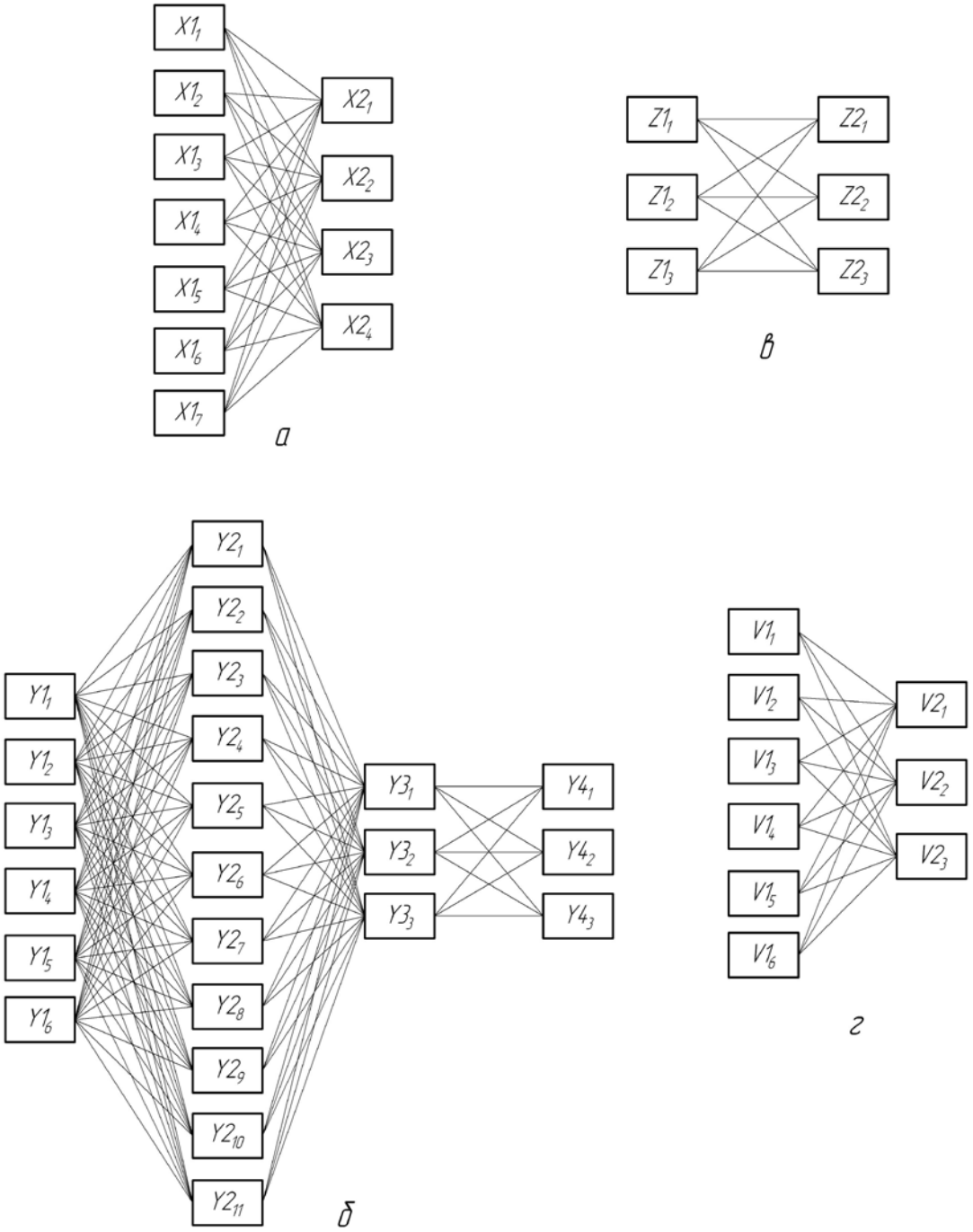


Рис. 4. Графы возможных структурных вариантов подсистем виброизолирующего устройства: а – корпус (*X*); б – виброизолятор (*Y*); в – устройство крепления (*Z*); г – привод (*V*).

С учётом большого количества вариантов синтез решения осуществляем, начиная с выбора вариантов подсистем, включая всё более и более существенные признаки. Кроме того, следует руководствоваться списком технических требований, определяющихся в первую очередь свойствами синтезируемой системы. В качестве примера зададимся конкретными свойствами технологической системы круглошлифовального станка 3Г71М, эксплуатируемого в условиях ПРМ:

1) масса – 3400 кг;
2) операция – плоское шлифование;
3) диапазон частот собственных колебаний – $f_z \leq 20$ Гц;
4) диапазон частот вынужденных колебаний – $f \leq 10$ Гц.

Вначале осуществляем выбор вариантов подсистемы «корпус».

Проводим выбор требований, предъявляемых к корпусу виброизолирующего устройства с учётом его основных функций, а также качественных показателей K_i^{I}, характеризующих технологичность, прочность, себестоимость.

Такими требованиями являются:

1) прочность (повышенная – $K_1^{\text{I}} = 1$, высокая – $K_1^{\text{I}} = 0{,}75$, средняя – $K_1^{\text{I}} = 0{,}5$);
2) технологичность (высокая – $K_2^{\text{I}} = 1{,}0$, низкая – $K_2^{\text{I}} = 0{,}5$);
3) себестоимость (высокая – $K_3^{\text{I}} = 0{,}5$, средняя – $K_3^{\text{I}} = 0{,}75$, малая – $K_3^{\text{I}} = 1{,}0$).

По формуле:

$$K_c = 1 - \sum_{i=1}^{n} \frac{1 - K_i}{n} \qquad (1)$$

определяем суммарный качественный показатель для каждой из возможных структур. Наибольшие численные значения (K_x = 0,93) принадлежат синтезированному варианту:

$$X^{'} = X1_{17} \begin{vmatrix} X1_1 \\ X1_2 \end{vmatrix} \rightarrow X2_1. \qquad (2)$$

Выбранный вариант представляет собой металлический корпус комбинированной формы – цилиндр с диском в нижней части.

Качественные показатели K_i^{II} в соответствии со следующими техническими требованиями:

1) виброизолирующие свойства (высокие – $K_1^{\text{II}} = 1{,}0$, средние – $K_1^{\text{II}} = 0{,}75$, минимально необходимые $K_1^{\text{II}} = 0{,}5$);
2) спектр гашения колебаний (широкий – $K_2^{\text{II}} = 1{,}0$, средний – $K_2^{\text{II}} = 0{,}75$, узкий – $K_2^{\text{II}} = 0{,}5$);
3) конструктивная сложность (высокая – $K_3^{\text{II}} = 0{,}5$, средней сложности – $K_3^{\text{II}} = 0{,}75$, простая – $K_3^{\text{II}} = 1{,}0$).

По аналогии с предыдущей подсистемой определим суммарный качественный показатель для «виброизолятора».

Наибольшая величина K_y = 0,84 принадлежит структуре:

$$Y^{'} = Y1_1 \rightarrow \begin{vmatrix} Y2_1 \\ Y2_7 \\ Y2_{10} \end{vmatrix} \rightarrow Y3_1 \rightarrow \begin{vmatrix} Y4_1 \\ Y4_2 \\ Y4_3 \end{vmatrix}. \qquad (3)$$

Виброизолятор, выполненный из резинового материала в виде цилиндра с внутренней полостью с поршнем и рабочим телом (масло), использует принципы растяжения-сжатия, изгибных деформаций, а также перемещения рабочего тела через дросселирующие отверстия.

Устройство крепления (Z) выбирается из заданных условий функционирования и может осуществляться присоединением к полу ($Z1$) и к станку ($Z2$).

По наибольшему качественному показателю K_i^{III} структуру устройства крепления выбираем на основании технических требований:

1) надёжность фиксации от горизонтальных перемещений (высокая – $K_1^{\text{III}} = 1{,}0$ средняя – $K_1^{\text{III}} = 0{,}75$, низкая – $K_1^{\text{III}} = 0{,}5$);
2) сложность конструкции (высокая – $K_2^{\text{III}} = 0{,}5$; средняя $K_2^{\text{III}} = 0{,}75$, малая – $K_2^{\text{III}} = 1{,}0$);
3) возможность переустановки (отсутствует – $K_3^{\text{III}} = 0{,}5$, имеется $K_3^{\text{III}} = 1{,}0$).

Максимальный суммарный показатель k_z = 0,92 получил вариант подсистемы «устройство крепления»:

$$Z^{'} = Z1_1 \rightarrow Z2_3. \qquad (4)$$

Структура $Z1$ имеет механическое крепление к полу цеха (к палубе ПРМ) и упруго-механическую фиксацию к станку.

Затем выбираем подсистему «привод» (V). При этом руководствуемся списком технических требований по наибольшему качественному показателю K_i^{IV}:

1) демпфирующие свойства (высокие – $K_1^{\text{IV}} = 1{,}0$; средние – $K_1^{\text{IV}} = 0{,}75$; низкие – $K_1^{\text{IV}} = 0{,}5$);
2) сложность конструктивной реализации (высокая – $K_2^{\text{IV}} = 0{,}5$; средняя – $K_2^{\text{IV}} = 0{,}75$; малая – $K_2^{\text{IV}} = 1{,}0$);
3) возможность компактной и автономной установки (имеется – $K_3^{\text{IV}} = 1{,}0$; отсутствует – $K_3^{\text{IV}} = 0{,}5$).

Максимальный суммарный качественный показатель K_v = 0,92 получил следующий вариант подсистемы привода:

$$V^1 = V1_2 \rightarrow V2_2. \qquad (5)$$

Привод выбран гидравлический с рычажной системой передачи прижимного усилия. На основе проведенного анализа подмножество синтезированных структур системы виброизолирующего устройства представим в виде графика на рис. 5.

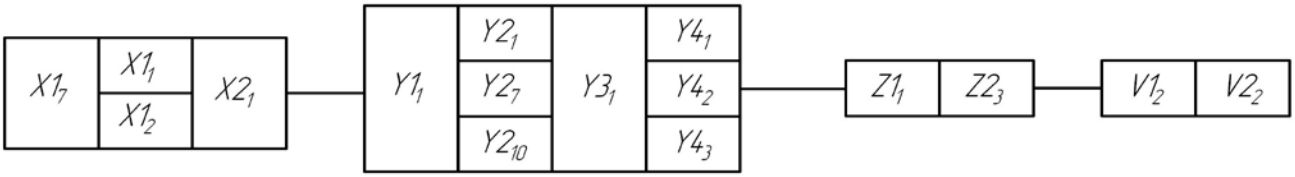


Рис. 5. Структура рационального варианта системы виброизолирующего устройства по качественным показателям.

Общее сочетание вариантов может быть различным, поэтому с учётом перспективы создания элементов из серийно выпускаемого оборудования путём модернизации и распределения его технологических возможностей, используя оценки качества подсистем, приведенные выше, выбираем рациональный структурный вариант:

$$X^{\text{I}} \to Y^{\text{I}} \to Z^{\text{I}} \to V^{\text{I}}. \qquad (6)$$

Проведенные мероприятия позволяют решить задачу синтеза на уровне структурно-компоновочной оптимизации. Этап параметрического синтеза и проведение дополнительных теоретических и практических исследований реальных конструкций виброизолирующих устройств, выполненные в Севастопольском национальном техническом университете, позволили создать новую конструкцию виброизолирующего устройства металлорежущего станка плавучей ремонтной мастерской [6]. Схема данного устройства изображена на рис. 6.

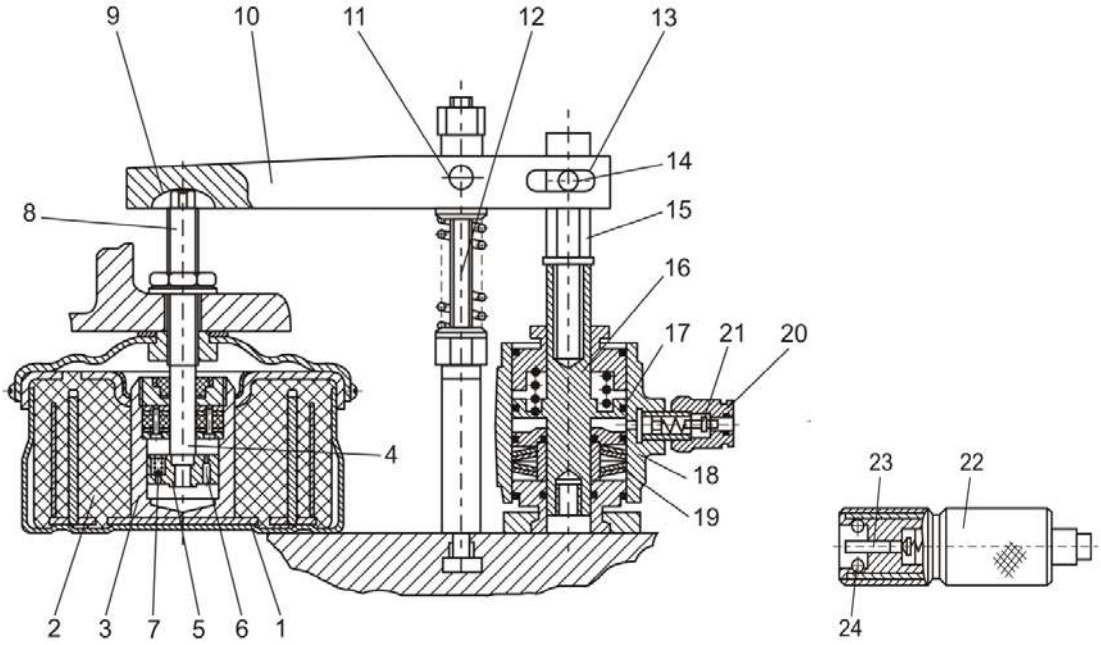


Рис. 6. Общий вид виброизолирующего устройства: 1 – основание; 2 – резиновый элемент; 3 – цилиндр; 4 – шток; 5 – поршень; 6 – калиброванное отверстие; 7 – клапан сжатия; 8 – регулировочный винт; 9 – сферическая поверхность лунки; 10 – прихват; 11 – ось; 12 – стойка; 13 – продольный паз; 14 – ось; 15 – опора; 16 – опорный шток; 17 – поршень; 18 – гидроцилиндр; 19 – пружинный аккумулятор; 20 – малая полумуфта; 21 – клапан; 22 – большая полумуфта; 23 – клапанный штырь; 24 – шарики.

Разработанное устройство повышает надёжность виброзащиты металлорежущих станков, работающих в условиях ПРМ от внешних колебаний, в том числе и от волнений водной поверхности, упрощает возможность монтажа и демонтажа технологического оборудования ПРМ повышает качество обработки деталей за счёт снижения высоты волнистости (W_z) поверхности путем уменьшения вынужденных и собственных колебаний (рис. 7) на режимах $S_{\text{пр}}$ = 20 м/мин, $S_{\text{пол}}$ = 5 мм/ход, t = 0,008 мм при плоском шлифовании (станок 3Г71М, материал – сталь Х12М).

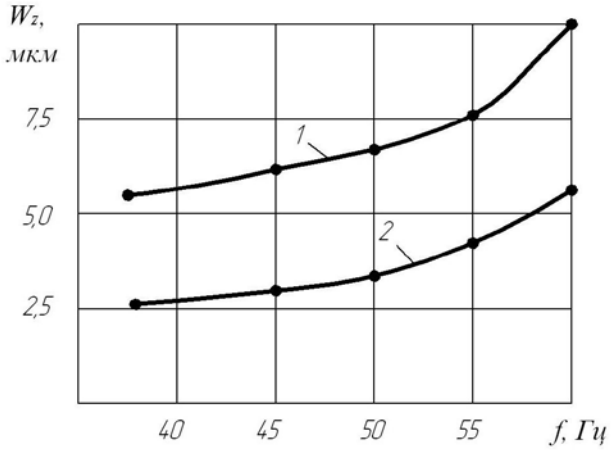


Рис. 7. Зависимость высоты волнистости обрабатываемой поверхности от частоты *f* вынужденных колебаний: 1 – станок на фундаменте; 2 – станок на виброизолирующей опоре новой конструкции.

Выводы. Проведенные в работе теоретические и экспериментальные исследования позволили обеспечить снижение волнистости поверхности обработки (W_z = 2,5…5,3 мкм) при плоском шлифовании за счет повышения виброустойчивости шлифовального станка, устанавливаемого на виброизолирующих опорах новой конструкции, разработанных для условий механообрабатывающих участков плавучих ремонтных мастерских.

Задачей дальнейших исследований является определение параметров потоков отказов и восстановлений синтезированного устройства для оценки его надежности при гашении колебаний от источников внешних возмущений.

ЛИТЕРАТУРА

1. Владецкая Е. А. Повышение виброустойчивости шлифовальных станков плавучих ремонтных мастерских / Е. А. Владецкая, С. М. Братан, А. О. Харченко // Сучасні технології в машинобудуванні : зб. наук. праць. Вип. 7. – Харків : НТУ «ХПІ», 2012. – С. 103–111.
2. Братан С. М. Анализ влияния колебаний, передаваемых через фундамент станка, на качество процесса шлифования / С. М. Братан, Е. А. Владецкая // Вестник НТУ «ХПИ» : сб. научн. трудов. – 2008. – № 35. – С. 13–22.
3. Владецкая Е. А. Определение состояния равновесия динамической системы при круглом шлифовании / Е. А. Владецкая, С. М. Братан, Д. А. Каинов // Оптимизация производственных процессов : сб. науч. тр. – Севастополь : Изд-во СевНТУ, 2009. – № 11. – С. 102–106.
4. Владецкая Е. А. Повышение виброустойчивости механообрабатывающего оборудования плавучих ремонтных мастерских / Е. А. Владецкая, А. О. Харченко, С. М. Братан // Вісник СевНТУ. Серія : Машиноприладобудування та транспорт : зб. наук. праць. – Севастополь : Вид-во СевНТУ, 2010. – Вип. 107. – С. 33–40.
5. Кузнецов Ю. Н. Теория технических систем / Ю. Н. Кузнецов, Ю. К. Новоселов, И. В. Луцив. – Севастополь : Изд-во СевНТУ, 2010. – 252 с.
6. Пат. № 51621 Україна, МПК B 23 Q 1/00. Віброізолюючий пристрій металорізального верстата плавучої ремонтної майстерні / О. О. Харченко, К. О. Владецька, С. М. Братан, Д. О. Владецький ; заявник та патентовласник Севастопольський національний технічний університет. – № 201000394 ; заявл. 18.01.2010 ; опубл. 26.07.2010. Бюл. № 14.

УДК 621.074

Падерин В. Н., Абдулгазис Д. У.

ОСОБЕННОСТИ ИЗГОТОВЛЕНИЯ ЦЕЛЬНЫХ АВТОМОБИЛЬНЫХ ДИСКОВ ИЗ АЛЮМИНИЕВЫХ СПЛАВОВ ЛИТЬЕМ ПОД НИЗКИМ ДАВЛЕНИЕМ В ФОРМЫ С ГИПСОВЫМИ ВСТАВКАМИ

Аннотация. *В статье рассмотрены особенности изготовления цельных автомобильных дисков из алюминиевых сплавов литьем под давлением в формы с гипсовыми вставками. Показано, что данным способом целесообразно пользоваться при мелкосерийном и серийном типе производства, при литье алюминиевых сплавов с применением робота для удаления из формы отливок из двух и более машин. При массовом производстве дисков рекомендуется изготавливать их из двух частей высокопроизводительным способом литья под давлением с дальнейшим сплавлением этих частей в цельный диск.*

Ключевые слова: *литье под низким давлением, автомобильные литые диски, гипсовые вставки, регулируемое давление, раздаточная печь с тиглем для расплава, металлопровод, металлическая форма, машина для литья под низким давлением.*

Падерин В. М., Абдулгазіс Д. У.

ОСОБЛИВОСТІ ВИГОТОВЛЕННЯ ЦІЛІСНИХ АВТОМОБІЛЬНИХ ДИСКІВ ІЗ АЛЮМІНІЄВИХ СПЛАВІВ ЛИТТЯМ ПІД НИЗЬКИМ ТИСКОМ У ФОРМИ З ГІПСОВИМИ ВСТАВКАМИ

Анотація. *У статті розглянуто особливості виготовлення цілісних автомобільних дисків із алюмінієвих сплавів литтям під тиском у форми з гіпсовими вставками. Показано, що цим способом доцільно користуватися при дрібносерійному й серійному типі виробництва, при литті алюмінієвих сплавів із застосуванням робота для видалення з форми виливків із двох і більше машин. При масовому виробництві дисків рекомендується виготовляти їх із двох частин високопродуктивним способом лиття під тиском із подальшим сплавом цих частин у цілісний диск.*

Ключові слова: *лиття під низьким тиском, автомобільні литі диски, гіпсові вставки, регульований тиск, роздавальна піч із тиглем для розплаву, металопровід, металева форма, машина для лиття під низьким тиском.*

Paderin V. N. Abdulgazis D. U.

FEATURES OF MANUFACTURING ALLOY WHEELS OF ALUMINUM ALLOY BY LOW PRESSURE DIE-CASTING IN THE MOULDS WITH GYPSUM INSERTS

Summary*. The features of manufacturing solid wheel rims of aluminum alloy by die casting into moulds with plaster inserts are revealed in the article. It is shown that this method is expedient to use at small-batch and batch production type, for casting aluminum alloy by using a robot to remove the castings from the mould of two or more machines. In mass production it is recommended to manufacture wheels of two parts by high performance die casting, with the further fusion of these parts into the wheel disk.*

Key words: *low-pressure casting, alloy wheels, solid, gypsum inserts, adjustable pressure, holding furnace with the crucible to melt, metal pipelines, metal mould, low pressure die-casting machine.*

Постановка проблемы. В настоящее время литые диски автомобильных колес изготавливают цельными или из двух частей с дальнейшим их сплавлением.

Одним из распространенных способов изготовления цельных, т. е. полностью готовых автомобильных дисков, является литьё под низким давлением (ЛНД). Величину последнего можно регулировать подачей сжатого воздуха или инертного газа на зеркало расплава в тигле раздаточной печи.

На рис. 1 показаны примеры разных конструкций цельных автомобильных дисков, изготовленных способом ЛНД.

Рис. 1. Различные формы узоров и конструкции автомобильных дисков.

Автомобильные диски отличаются по сложности узора, форме, конструкции, размерам, в связи с чем их вес колеблется от 4-х до 10-ти кг и более, что значительно влияет на технологию производства и качество изготовления.

Анализ публикаций показывает, что в литературе имеется ограниченная информация о применении способа ЛНД для изготовления качественных цельных литых дисков с высокой производительностью и низкой трудоёмкостью [1–2].

В связи с этим **целью** данной **статьи** является оценка целесообразности применения способа ЛНД цельных литых дисков, его преимуществ и недостатков, эффективности применения, а также определение путей совершенствования существующего технологического процесса до полной его механизации и автоматизации.

Изложение основного материала. Основными преимуществами ЛНД являются возможность получения заготовок с минимальными припусками на механическую обработку (или без неё), с шероховатостью необработанных поверхностей до R_z 12,5 мкм, а также обеспечение высокой производительности и низкой трудоёмкости изготовления деталей.

ЛНД создаёт широкие возможности для управления процессом заполнения формы расплавом. Если внутрь герметичной раздаточной печи машины ЛНД подавать сжатый воздух или инертный газ под давлением $P_{изб} > P_{атм}$, то за счёт разницы давлений расплав автоматически поднимется по металлопроводу и заполняет форму до необходимого уровня.

Машины для ЛНД обычно состоят из механизмов сборки и разборки форм, отделения отливок от формы, раздаточной печи для заливки расплава в форму, гидравлической, пневматической и электрической систем управления.

Многочисленные конструкции разработанных универсальных и специализированных машин различаются размерами рабочей зоны для размещения формы, числом подвижных элементов для сборки и разборки формы, типами раздаточных печей, компоновочной схемой, реализующей варианты обслуживания отдельных агрегатов машины, степенью механизации и автоматизации вспомогательных операций.

На рис. 2 показан один из типов машин для литья под низким давлением ёмкостью 250 кг для получения цельных отливок дисков и других деталей из алюминиевых сплавов в металлических формах с гипсовыми вставками и горизонтальной плоскостью разъёма.

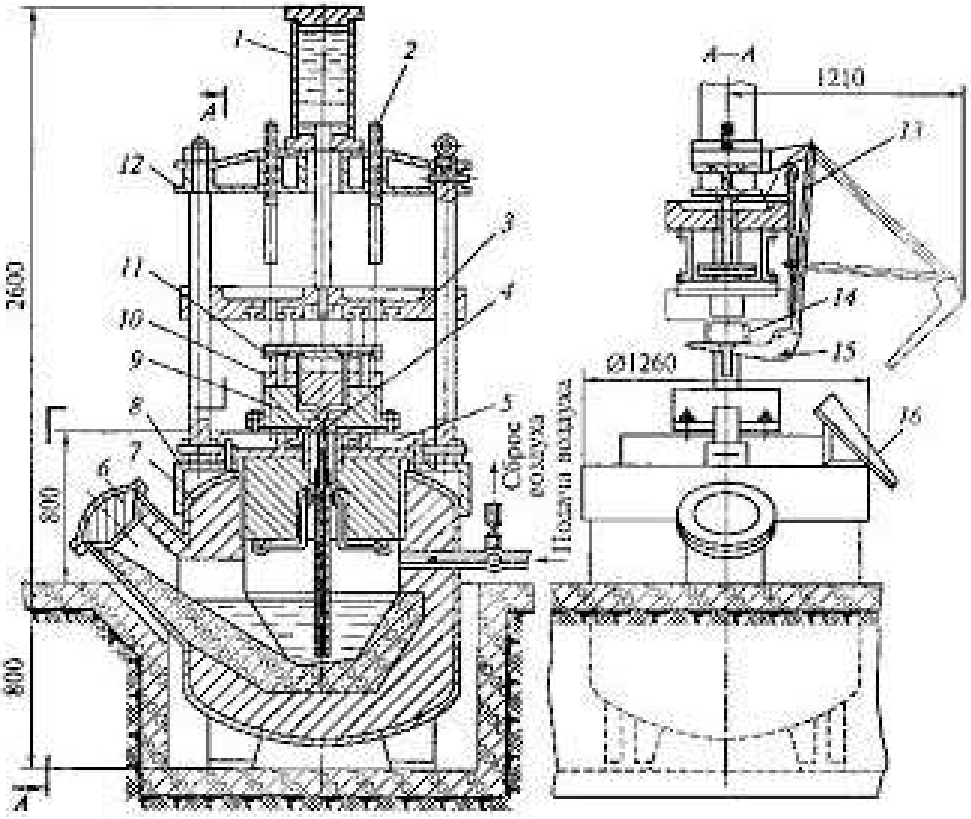


Рис. 2. Машина для литья под низким регулируемым давлением с ёмкостью расплава 250 кг:
1 – гидроцилиндр; 2 – штанги для движения плиты толкателей; 3 – подвижная траверса;
4 – металлопровод; 5 – плита; 6 – крышка заливочного окна; 7 – металлораздатчик; 8 – рама печи;
9 – нижняя половина формы; 10 – верхняя половина формы; 11 – плита толкателей;
12 – неподвижная траверса; 13 – рычажный механизм; 14 – отливка; 15 – приемный лоток; 16 – склиз.

В данной машине раздаточная печь 7 – это герметизированная электропечь ванного типа с заливочной горловиной, закрывающейся футерованной крышкой 6 на поролоновой прокладке. На раме печи 8 расположена плита 5 с металлопроводом 4 из жаростойкого материала. К нижней стороне этой плиты на болтах подвешен свод печи с нагревателями, а на верхней плоскости закреплена нижняя неподвижная половина формы 9. Верхняя половина формы 10 крепится в пазах подвижной траверсы 3. На неподвижной траверсе 12 размещен гидроцилиндр, предназначенный для перемещения верхней половины формы. Регулируемые по высоте штанги 2 служат для выталкивания отливки плитой толкателя 11 из верхней половины формы. Отливка 14 удаляется из рабочего пространства установки вспомогательным устройством, состоящим из приемного лотка 15, перемещаемого рычажным механизмом 13. При раскрытой форме лоток 15 находится под отливкой, при закрытой – отходит в сторону, сбрасывая отливку на склиз 16. Металлопровод 4 погружают в расплав таким образом, чтобы его конец не доходил до дна тигля на 40–60 мм. Полость в отливке может быть выполнена гипсовым, металлическим, оболочковым или песчаным стержнем.

Воздух или инертный газ под давлением до 0,05–0,07 МПа через систему регулирования поступает по трубопроводу внутрь раздаточной печи и давит на зеркало расплава. Вследствие разности давления расплав поступает в форму снизу, через металлопровод, со скоростью, регулируемой давлением в раздаточной печи. После окончания заполнения формы для повышения плотности отливки давление в системе можно увеличивать до конца затвердевания отливки, после чего автоматически открывается клапан, соединяющий раздаточную печь с атмосферой. После этого давление воздуха снижается до атмосферного, и незатвердевший расплав из металлопровода сливается обратно в тигель раздаточной печи. После охлаждения отливки до заданной температуры форма раскрывается, отливка выталкивается и цикл повторяется.

Учитывая, что машина ЛНД (рис. 2) имеет ёмкость 250 кг, её рекомендуется применять для литья малых и средних по размерам дисков. Для

изготовления автомобильных дисков 10 кг и более рекомендуется применять машины с наклоняемой индукционной плавильной печью ёмкостью 1 тонна, установив её рядом с заливочным окном. Кроме того, рекомендуется использовать эту печь для доливки расплава одновременно в несколько машин для ЛНД с помощью разливочного ковша, как показано на рис. 3.

Рис. 3. Наклоняемая индукционная плавильная печь модели ИАТ-1/0,4М3 с ёмкостью расплава 1 тонна.

На рис. 4 показан другой тип машины для ЛНД модели 214 с одной раздаточной печью ёмкостью 250 кг, с помощью которой рекомендуется изготавливать диски весом 4–6 кг.

Рис. 4. Машина для ЛНД модели 214 с одной раздаточной печью.

Для литья больших по размерам дисков 10 кг и выше рекомендуется применение машин с двумя сменными раздаточными печами, как показано на рис. 5.

Рис. 5. Машина для ЛНД с двумя раздаточными печами.

На рис. 6 показана литейная форма для изготовления цельных дисков в раскрытом состоянии без верхней крышки со вставками. Форма сделана из металла с гипсовыми вставками, выдерживающими температуру до 1600ºС. Конструкция формы состоит из 4-х боковых вставок и фигурной вставки с узором, установленной на дне формы. Боковые вставки отодвигаются гидравлическими цилиндрами. Сверху на форму устанавливается крышка со вставками, оформляющими внутреннюю полость диска. На рис. 7 показано установленное на автомобиле колесо с диском, которое изготовлено в этой форме.

Рис. 6. Нижняя часть формы.

Рис. 7. Диск, отлитый в форме, изображенной на рис. 6.

Отлитый диск при этом необходимо извлекать из формы при более высокой температуре, когда усадка отливки ещё незначительна, и она легко удаляется.

Диски, полученные ЛНД, отличаются малым уровнем остаточных напряжений и незначительным короблением.

Использование низких давлений и малых скоростей уменьшает требования к прочности деталей формы, что позволяет существенно уменьшить толщину плит и вес формы по сравнению с литьём под давлением. Форма может изготавливаться из недорогих, легко обрабатываемых материалов.

Конструкция полости формы и конструкция её вентиляционной системы также оказывают влияние на характер движения расплава в полости формы и металлопроводе. При ЛНД цельных дисков недостаточная площадь вентиляционных каналов приводит к возрастанию противодавления воздуха в полости формы, снижает скорость потока расплава, повышает пористость отливок и снижает их прочность.

Тепловые условия формирования отливки создают возможность направленного затвердевания отливки и питания её усадки. Части формы, расположенные на верхней плите рабочей раздаточной печи, нагреваются до температуры большей, чем верхняя часть формы. Кроме того, через нижние сечения полости формы, расположенные ближе к металлопроводу, проходит большее количество расплава, чем через сечения, расположенные в верхней части, что существенно увеличивает разницу температур в нижней и верхней частях отливки. Поэтому массивные части отливок дисков, требующие питания, располагают внизу формы, соединяют их массивными литниками с металлопроводом, а вверху формы располагают части отливки, не требующие питания.

Статическое давление на расплав по окончании заполнения формы улучшает контакт затвердевающей корочки и поверхности формы, вследствие чего увеличивается скорость затвердевания отливки. Вместе с тем давление воздуха на расплав в тигле способствует постоянной подпитке усаживающейся отливки диска, в результате чего уменьшается усадочная пористость, возрастает плотность и повышаются механические свойства отливки.

На рис. 8 показан участок цеха, где изготавливают цельные диски способом ЛНД.

Рис. 8. Вид на участок цеха, где изготавливают цельные диски.

Из фото на рис. 8 видно, что извлечение отливок дисков производится с помощью одного робота, который обслуживает сразу три машины для ЛНД. На переднем плане видны отливки с боковой литниковой системой, подведенной в самую массивную часть на ободе диска.

Главным недостатком всех машин для ЛНД является низкая стойкость металлопровода из-за того, что он всё время находится в расплаве и, даже будучи изготовленным из жаропрочной стали, постепенно прогорает. Это недопустимо, так как часть воздуха или газов в раздаточной печи над зеркалом расплава попадёт в отливку диска, снижая прочность и повышая пористость литой детали.

Для устранения этого дефекта рекомендуется изготавливать металлопровод из дюралюминия марки Д16Т, а затем нанести снаружи и внутри дополнительно гальваническим методом термостойкое покрытие в виде анодной пленки толщиной до 0,5 мм. При этом анодированный слой обладает высокой температурой плавления (до 2323°К), большой твердостью (до 40–50 HRC) и малой теплопроводностью.

Литьё титановых дисков из-за высокой температуры его плавления, равной 1668°С, и очень низкой из-за этого стойкости формы, выполненной даже из жаропрочной стали, и частого прогорания металлопровода вследствие постоянного пребывания в расплаве, изготавливать способом ЛНД не рекомендуется. Поэтому изготавливать титановые диски наиболее целесообразно способом литья по газифицируемым моделям, форма которого выдерживает до 2050°С и выше.

Вывод. Анализ ЛНД цельных дисков показывает, что этим способом целесообразно пользоваться при мелкосерийном и серийном типе производства при литье алюминиевых сплавов с применением робота для удаления из формы отливок из 2-х и более машин. При массовом производстве дисков рекомендуется изготавливать их из двух частей высокопроизводительным способом ЛПД в простых пресс-формах в автоматическом режиме с дальнейшим сплавлением этих частей в цельный диск с помощью специальных индукторов токами высокой частоты.

ЛИТЕРАТУРА

1. Падерин В. Н. Оборудование и технология заготовительного производства : учеб. пособие для студ. спец. «Автомобильный транспорт» РВУЗ «КИПУ» : в 2 ч. / В. Н. Падерин, У. А. Абдулгазис. – Симферополь : ДИАЙПИ, 2014. – Часть 2. Литье под давлением деталей автомобилей. – 173 с.
2. Падерин В. Н. Оборудование и технология заготовительного производства : учеб. пособие для студ. спец. «Технология машиностроения» РВУЗ «КИПУ» / В. Н. Падерин, А. В. Падерин. – Симферополь : ОСАQ, 2011. – 439 с.

УДК 621.92

Умеров Э. Д., Ягьяев Э. Э.

ОСОБЕННОСТИ МОДЕЛИРОВАНИЯ ПОВЕДЕНИЯ ТЕХНИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ ПРОЦЕССА РЕЗАНИЯ ПРИ СВЕРЛЕНИИ

Аннотация. *В статье рассмотрены особенности моделирования поведения технической системы применительно к операции сверления. Предложена функциональная схема операции сверления и выполнена декомпозиция операции сверления. Предложена зависимость состояния выходных переменных от входных переменных и параметров состояния технической системы. Показано влияние изменений параметров состояния технологической системы на выходные переменные операции сверления.*

Ключевые слова: *операция сверления, системный подход, технологическая система, параметры состояния, входные, выходные переменные.*

Умєров Е. Д., Ягьяєв Е. Е.

ОСОБЛИВОСТІ МОДЕЛЮВАННЯ ПОВЕДІНКИ ТЕХНІЧНОЇ СИСТЕМИ ПРОЦЕСУ РІЗАННЯ ПРИ СВЕРДЛІННІ

Анотація. *У статті розглянуто особливості моделювання поведінки технічної систем, що стосуються операції свердління. Запропоновано функціональну схему операції свердління й виконана декомпозиція операції свердління. Запропоновано залежність стану вихідних змінних від вхідних змінних і параметрів стану технічної системи. Показано вплив змін параметрів стану технологічної системи на вихідні змінні операції свердління.*

Ключові слова: *операція свердління, системний підхід, технологічна система, параметри стану, вхідні, вихідні змінні.*

Umerov E. D., Yagyaev E. E.

FEATURES OF MODELING THE BEHAVIOUR OF TECHNICAL CUTTING SYSTEM AT DRILLING

Summary. *The article describes the details of modeling the behavior of the technical system in relation to drilling. Functional diagram of drilling is proposed and decomposing of drilling operation is held. In this case, the system is divided into subsystems that have their vectors of input and output variables as well as the state parameters of the subsystem. In addition, each subsystem is interconnected both directly and by feedback. The dependence of the state of output variables from input variables and parameters of the technical system are proposed. The impact of changes of the state of technological system parameters on the output variables of drilling operation is shown. However, these parameters affect the numerical values of the output variables of the technological system.*

Key words: *drilling operation, system approach, the technological system, the state parameters, input, output variables.*

Постановка проблемы. На сегодняшний день с развитием науки и техники имеется весьма большой опыт в области теоретических и экспериментальных исследований, которые нам позволяют создавать математические модели для различных технологических процессов.

Однако полученные таким образом модели не всегда позволяют получить удовлетворяющий нас результат, т. к. не учитываются в полной мере изменения состояния технологической системы. Для решения данной проблемы возможно использование системного подхода [1].

Анализ литературы. Анализ работ, выполненных в области описания процесса сверления, показал, что наиболее пригодными для этого являются теоретические модели, предложенные в работах [2–5], которые при соответствующей доработке позволяют не только учесть многообразие факторов, влияющих на выходные переменные, но и проследить динамику изменения параметров системы.

Цель статьи – рассмотреть особенности моделирования поведения технической системы и определить влияние изменений параметров состояния технологической системы на выходные переменные операции сверления.

Изложение основного материала. Современные системы управления станками позволяют проводить коррекцию в процессе обработки, но для ее осуществления необходима диагностическая информация о текущем состоянии параметров системы и модели, устанавливающих связь входных переменных с выходными и параметрами управления.

Таким образом, применяемые при сверлении методы описания процесса сверления должны быть основаны на использовании системного подхода, позволяющего более полно учесть влияние большинства факторов, влияющих на процесс резания.

Сущность такого подхода состоит в том, что рассматриваемая система разбивается на две части. Первой частью является технологическая система, а второй – окружающая среда. При этом все имеющиеся связи системы разделяются на входные, выходные переменные и параметры состояния технологической системы.

На рис. 1 представлена функциональная схема операции сверления, на которой вектором X обозначены входные, а вектором Y – выходные переменные. Такая система характеризуется совокупностью параметров состояния Z: $Z(t) = (z_1(t), z_2(t), \ldots, z_k(t))$, которые могут изменяться в процессе работы системы [1].

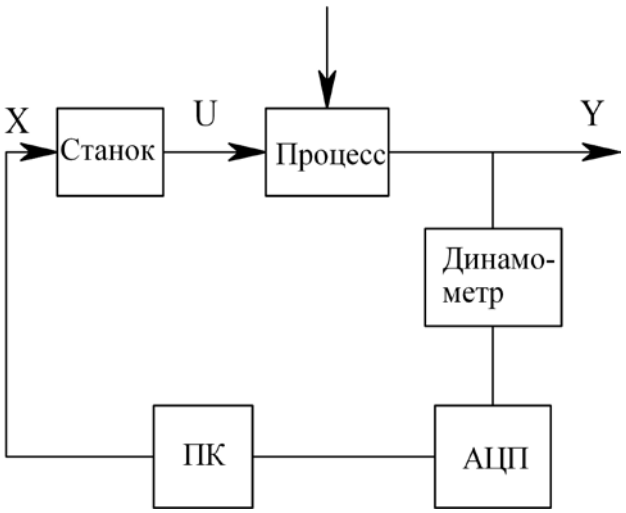


Рис. 1. Функциональная схема.

Для того чтобы определить, в каком объеме изменяются входные переменные X и направление состояния $Z(t)$, влияющие на выходные переменные Y, выполним декомпозицию процесса сверления. При этом рассматриваемая система разбивается на подсистемы и устанавливается связь каждой подсистемы друг с другом и окружающей средой.

В нашем случае процесс сверления разбивается на такие подсистемы: подсистема числового программного управления ЧПУ, подсистема инструмента, подсистема станка, зона контакта, подсистема приспособления, подсистема смазочно-охлаждающих технологических средств (СОТС), заготовка и контрольно-измерительная подсистема. Каждая подсистема имеет свои параметры состояния, входные и выходные переменные и набор других свойств.

Современные станки имеют различные конструктивные особенности и оснащены системой числового программного управления (ЧПУ). В ряде научных работ (например [6; 7]) освещены вопросы входных и выходных переменных различных подсистем, влияющих на ту или иную технологическую операцию.

С учетом этих особенностей нами выделена отдельная подсистема работы с числовым программным управлением. При работе станка изменяются координаты исполнительных элементов, изменяя при этом параметры состояния каждой подсистемы. Затем на входные переменные подсистем инструмента, заготовки и СОТС действуют силы и момент, которые образуют подсистему зоны контакта режущего инструмента с заготовкой.

На рис. 2. представлена декомпозиция на примере операции сверления.

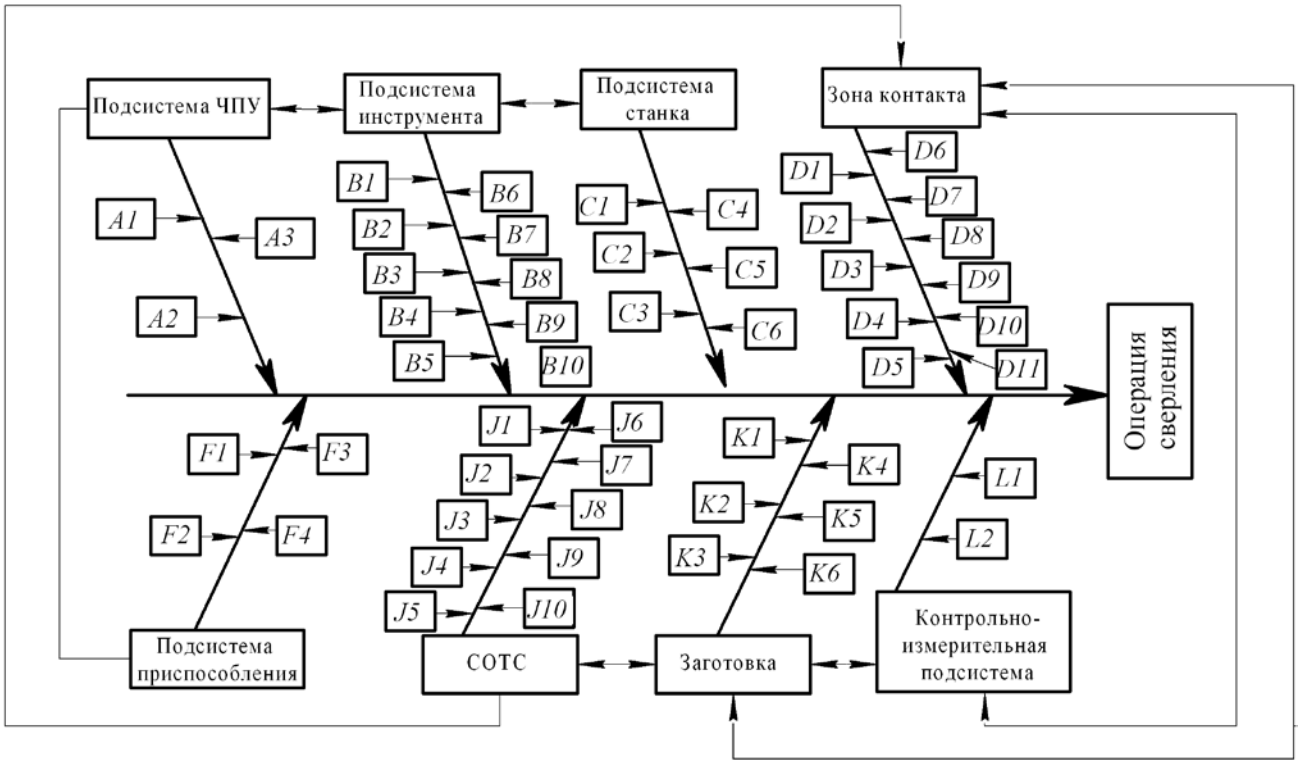


Рис. 2. Декомпозиция операции сверления, причинно-следственная диаграмма Исикавы.

Как каждая система, так и каждая подсистема имеет свои векторы входных и выходных переменных, а также параметры состояния подсистемы. При этом каждая подсистема связана между собой как прямыми, так и обратными связями. На примере процесса обработки на станках с ЧПУ управление подсистемой ЧПУ происходит за счет управляющей программы, которая в свою очередь задает последовательность работы исполнительных механизмов станка.

При этом система ЧПУ контролирует правильность работы программы с помощью контрольно-измерительной подсистемы путем сравнения поступающей от нее информации. Так, при очередной работе станка закрепленная деталь и режущий инструмент изменяют свое пространственное положение, изменяя состояние каждой из подсистем. При этом силы, действующие на приспособления, поступают на вход различных подсистем, например, инструмента, СОТС и т. д.

Таким образом, существуют различные параметры состояния системы, которые влияют в процессе работы на состояние подсистем. Поэтому необходимо иметь информацию для правильного описания состояния технической системы.

С учетом выполненной декомпозиции операции сверления представим зависимость состояния выходных переменных от входных переменных и параметров состояния технической системы:

$$Y(t) = F(X(t); Z(t); U(t)), \quad (1)$$

где $Y(t)$ – вектор выходных переменных при j-м цикле в момент времени t;

$X(t)$ – соответствующий вектор входных переменных;

$Z(t)$ – вектор параметров состояния технологической системы в момент времени t;

$U(t)$ – соответствующий вектор управляющих воздействий.

Для случая операции сверления эта зависимость будет иметь вид:

$$Y(t) = (e; W; R_a, P_0, M_{кр}),$$

где e – эксцентриситет;

W – волнистость;

R_a – шероховатость поверхности;

P_0, $M_{кр}$ – силы резания.

Как показывает анализ зависимости (1), изменения входных переменных оказывают влияние на значения выходных переменных и на параметры состояния технологической системы.

В нашей статье рассматривается влияние СОТС различного состава на процесс резания, характеризующийся такими параметрами, как P_0, $M_{кр}$, T, R_a. Состав СОТС относится к входным переменным процесса сверления и оказывает влияние согласно зависимости (1) на выходные переменные процесса сверления.

С учетом анализа литературных источников на основе декомпозиции (рис. 2) в табл. 1 представлены наиболее важные параметры входных переменных, влияющих на состояние выходных переменных.

Таблица 1.

Основные входные переменные, параметры состояния и выходные переменные операции сверления.

Подсистема	Входные переменные, начальные условия	Параметры состояния	Выходные переменные
ЧПУ (A_i)	1. Управляющая программа. 2. Данные датчиков контрольно-измерительной системы. 3. Оперативная информации от ЭВМ верхнего уровня.	1. Параметры процессов обработки информации и выработки управляющих сигналов.	1. Управляющие сигналы на исполнительные механизмы станка. 2. Оперативная информация ЭВМ верхнего уровня.
Станок (B_i), приспособление (F_i)	1. Начальные технические данные станка и приспособления. 2. Начальные характеристики положения деталей станка. 3. Начальная температура узлов станка. 4. Параметры настройки станка. 5. Силы реакций инструмента. 6. Тепловой поток от заготовки. 7. Реакции СОТС.	1. Текущие технические данные станка и приспособления. 2. Текущие характеристики пространственного положения узлов и деталей. 3. Скорости и ускорения движения деталей. 4. Силы и реакции в системе станок–приспособление. 5. Текущая температура узлов и деталей.	1. Пространственное расположение исполнительных механизмов. 2. Движущие силы инструмента. 3. Движущие силы заготовки. 4. Тепловой поток СОТС. 5. Движущие силы СОТС. 6. Тепловой поток в среду. 7. Износ узлов и деталей станка. 8. Расход электроэнергии и материалов.
Инструмент (C_i)	1. Начальная геометрия рабочей поверхности инструмента. 2. Физико-механические свойства инструмента. 3. Начальная температура. 4. Силы реакции. 5. Скорость износа инструмента. 6. Скорости изнашивания и разрушения режущих кромок. 7. Изменение количества, геометрии и свойств налипающих частичек материала. 8. Тепловой поток из зоны контакта. 9. Химическое и механическое воздействие СОТС.	1. Координаты положения относительно системы. 2. Скорости и ускорения движения инструмента и режущих кромок. 3. Текущая температура. 4. Текущие размеры, форма инструмента, число, форма, распределение режущих кромок. 5. Физико-механические свойства инструмента. 6. Количество, геометрия и свойства налипающих частичек материала.	1. Координаты положения относительно заготовки. 2. Скорости движения инструмента и режущих кромок. 3. Размеры, форма инструмента, число, форма, распределение режущих кромок. 4. Физико-механические свойства инструмента. 5. Количество, геометрия и свойства налипающих частичек материала. 6. Тепловой поток в СОТС, станок и среду 7. Силы, действующие от инструмента на заготовку. 8. Силы реакций на станок, приспособление, СОТС, среду.
Заготовка (K_i)	1. Начальные параметры, геометрия инструмента. 2. Физико-механические свойства обрабатываемого материала. 3. Начальная температура. 4. Силы реакций. 5. Изменения параметров шероховатости, физико-механических свойств поверхностного слоя.	1. Координаты положения относительно системы. 2. Текущие параметры геометрии, физико-механические свойства обрабатываемого материала. 3. Текущая температура.	1. Координаты положения относительно инструмента. 2. Размеры, форма обрабатываемой поверхности; размеры, форма, число, распределение единичных царапин. 3. Физико-механическое состояние поверхностного слоя. 4. Силы, действующие от заготовки на инструмент. 5. Силы реакций на станок, тепловой поток в СОТС, станок, среду.

СОТС (J_i)	1. Начальный состав и свойства СОТС. 2. Начальная температура СОТС. 3. Изменение химического состава СОТС. 4. Формы, число и размеры стружек, частиц абразива. 5. Силы реакций от инструмента. 6. Силы реакций от заготовки. 7. Тепловой поток от инструмента. 8. Тепловой поток от заготовки. 9. Тепловой поток от станка.	1. Текущие характеристики состава и свойств СОТС. 2. Текущая температура СОТС. 3. Размеры и форма потоков СОТС. 4. Скорости потоков СОТС. 5. Степень загрязненности СОТС.	1. Охлаждающая, смазывающая и химическое действие СОТС на заготовку, силы реакции на заготовку. 2. Охлаждающая, смазывающая и химическое действие СОТС на инструмент, силы реакции на инструмент. 3. Силы реакции на станок. 4. Тепловой поток в среду. 5. Расход СОТС. 6. Влияние СОТС на процессы зоны контакта.
Зона контакта (D_i)	1. Пространственное расположение инструмента. 2. Скорости движения режущего инструмента. 3. Размеры, форма инструмента, число, форма, состояния режущих кромок. 4. Физико-механические свойства инструмента. 5. Количество, геометрия и свойства налипающих на инструмент частичек материала. 6. Силы, действующие от инструмента на заготовку. 7. Пространственное расположение заготовки. 8. Размеры, форма обрабатываемой поверхности, размеры, форма, число, распределение единичных царапин. 9. Физико-механические свойства материала поверхностного слоя. 10. Силы, действующие от заготовки на инструмент. 11. Охлаждающее, смазывающее и химическое действие СОТС.	1. Форма и размеры зоны обработки. 2. Параметры процесса стружкообразования. 3. Реакции обрабатываемый материал, СОТС. 4. Текущие скорости перемещений режущих кромок в обрабатываемом материале. 5. Форма, число и распределение поверхностей резания. 6. Текущие размеры и форма условий границы поверхностей резания. 7. Параметры процессов пластических, упругих, температурных деформаций. 8. Параметры теплового поля. 9. Скорость износа режущего инструмента. 10. Вероятность разрушения инструмента. 11. Форма и размеры скалывающихся частиц режущего инструмента.	1. Силы реакции на инструмент, заготовку, СОТС. 2. Тепловой поток в инструмент, заготовку, стружку, СОТС, окружающую среду. 3. Скорость износа инструмента. 4. Скорость изнашивания режущих кромок. 5. Изменение геометрии, числа и свойств частичек материала, налипающих на инструмент. 6. Скорость съема материала. 7. Изменение размеров, формы, шероховатости поверхности, физико-механических свойств материала поверхностного слоя заготовки. 8. Изменение химического состава СОТС. 9. Форма и размеры единичных стружек.
Контрольно-измерительная подсистема (L_i)	1. Значения контролируемых параметров. 2. Параметры состояния окружающей среды.	1. Пространственное расположение измерительных элементов. 2. Параметры механических и физических процессов измерительной системы.	1. Информация о значениях контролируемых параметров.

По аналогии такая схема может быть применена и к режущему инструменту. Увеличение износа инструмента приводит к увеличению погрешности обработки, влияющей на качество обработанной поверхности и на силы резания в сторону их увеличения.

Таким образом, возникает систематическая ошибка (погрешность размера), которая может быть устранена за счет системы управления станка. При этом на процесс сверления будут влиять такие характеристики РИ (сверла), как материал, состояние режущей кромки до и в процессе работы, эксцентриситет сверла, структура и т. д.

В табл. 2 представлено влияние изменений параметров состояния технологической системы по аналогии с работой [8] с учетом операции сверления.

Таблица 2.

Влияние изменений параметров состояния технологической системы на выходные переменные операции сверления.

Подсистема	**Вид изменений**	**Выходные переменные**	**Влияние на выходную переменную, %**
Станок	Точность перемещения исполнительных механизмов	W	100
	Жесткость станка	P_0, $M_{кр}$	40
	Частота вращения шпинделя	R_a	100
Приспособление	Точность закрепления заготовки	W	80
Заготовка	Расположение поверхностей	e	80
	Форма поверхностей	W, e	80
	Материал	P_0, $M_{кр}$	60
Инструмент	Диаметр при износе и состояние рабочей поверхности отклонения формы режущего инструмента	e, R_a	100
	Твердости		
	- с покрытием	R_a, W	100
	- без покрытия	W	90
	Величина износа	P_0, $M_{кр}$, R_a	90
СОТС	Состав	R_a P_0, $M_{кр}$	100
	Основа СОТС		70
	Уровень загрязнения		40
	Метод активации		80
	Способ подачи		40
	Присадка		80

Проанализировав табл. 2, можно сказать, что параметры качества обрабатываемых деталей зависят от каждой подсистемы. Например, качество обработанной поверхности (шероховатость, волнистость и т. д.) будут зависеть от износа режущего инструмента, наростообразования, изменения его в диаметре, настройки станка, а также от состава и уровня загрязнения СОТС.

Например, при изготовлении одной партии деталей их твердость может незначительно изменяться, приводя к изменению параметров выходных переменных при сверлении. Твердость каждой партии может быть замерена потребителем специальными приборами, которые имеются на больших предприятиях. Поэтому не каждый потребитель проводит контроль обработанных деталей.

Так, изменения твердости режущего инструмента, даже в незначительной степени, приводит к изменению выходных переменных технической системы, которое носит закономерный характер, проявляющийся в процессе работы.

Таким образом, проведенный нами анализ показывает, что изменение параметров состояния технологической системы влияет на состояние выходных переменных при операции сверления в процессе обработки деталей.

Параметры входных переменных в процессе сверления влияют на численные значения параметров выходных переменных технологической системы.

В дальнейшем планируется изучение влияния различных составов СОТС на такие выходные переменные процесса сверления, как сила резания, крутящий момент, температура, шероховатость, точность.

ЛИТЕРАТУРА

1. Кузнецов Ю. Н. Теория технических систем / Ю. Н. Кузнецов, Ю. К. Новоселов, И. В. Луцив. – Севастополь : СевНТУ, 2010. – 251 с.
2. Линчевский П. А. Обработка деталей на отделочно-расточных станках / П. А. Линчевский, Т. Г. Джугурян, А. А. Оргиян. – К. : Техника, 2001. – 300 с.

3. Кирсанов С. В. Инструменты для обработки точных отверстий / С. В. Кирсанов, В. А. Гречишников. – М. : Машиностроение, 2003. –330 с.
4. Линчевский П. А. Расчет износа инструмента на основе динамической модели механической обработки / П. А. Линчевский, С. С. Фотти, В. И. Попов // Известия вузов. Машиностроение. – 1985. – № 2. – С. 122–124.
5. Линчевский П. А. Разработка теории и технологии управления операциями предварительной лезвийной обработки деталей машин с учетом динамической модели предельного износа режущего инструмента / П. А. Линчевский // Сборник трудов отделения тяжелого и транспортного машиностроения Академии инженерных наук Украины. – Днепропетровск, 1996. – С. 52–57.
6. Королев А. В. Теоретико-вероятностные основы абразивной обработки / А. В. Королев, Ю. К. Новоселов. – Саратов : Изд-во Сарат. ун-та, 1987. – Часть 1. Состояние рабочей поверхности абразивного инструмента. – 158 с.
7. Островский В. И. Анализ силы резания с целью оптимизации процесса шлифования / В. И. Островский, В. Г. Савицкая // Оптимизация условий эксплуатации и выбора характеристик абразивного инструмента в машиностроении : тез. докл. Всесоюзной конф. – Л., 1981. – С. 48–50.
8. Новоселов Ю. К. Диагностика операций чистового шлифования / Ю. К. Новоселов, Э. Э. Ягьяев // Оптимизация производственных процессов : сб. науч. трудов. – Севастополь : Изд-во СевНТУ, 2007. – Вып. 10. – С. 52–56.

УДК 621.92

Богуцкий В. Б., Шрон Л. Б.

ОБЕСПЕЧЕНИЕ СТАБИЛЬНОСТИ ПАРАМЕТРОВ КАЧЕСТВА ПРИ ШЛИФОВАНИИ И ЗАТОЧКЕ ПРОТЯЖЕК

Аннотация. *В статье рассмотрена проблема стабилизации показателей качества при шлифовании и заточке протяжек за счет управления температурой в зоне контакта. Процесс шлифования имеет сложную стохастическую природу, при котором меняются параметры не только объекта, но и самой технологической системы. Обработка заготовок выполняется в условиях непостоянства параметров технологической системы обработки и окружающей среды. Изменение одних параметров протекает за период обработки одной детали, других – в течение смены, третьих – в течение более длительного периода. Для повышения стабильности качества изделий необходимо в полной мере использовать технологические возможности чистового и тонкого шлифования.*

Ключевые слова: *шлифование, прерывистый шлифовальный круг, режущий инструмент, стойкость инструмента, технологическая система.*

Богуцький В. Б., Шрон Л. Б.

ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ СТАБІЛЬНОСТІ ПАРАМЕТРІВ ЯКОСТІ ПРИ ШЛІФУВАННІ Й ЗАТОЧУВАННІ ПРОТЯЖОК

Анотація. *У статті розглянуто проблему стабілізації показників якості при шліфуванні і заточуванні протяжок за рахунок управління температурою в зоні контакту. Процес шліфування має складну стохастичну природу, при якому змінюються параметри не тільки об'єкта, але й самої технологічної системи. Обробка заготовок виконується в умовах непостійності параметрів технологічної системи обробки й навколишнього середовища. Зміна одних параметрів протікає за період обробки однієї деталі, інших – протягом зміни, третіх – протягом більш тривалого періоду. Для підвищення стабільності якості виробів необхідно повною мірою використовувати технологічні можливості чистового і тонкого шліфування.*

Ключові слова: *шліфування, переривчастий шліфувальний круг, ріжучий інструмент, стійкість інструменту, технологічна система.*

Bogutskiy V. B., Shron L. B.

ENSURING THE STABILITY OF QUALITY PARAMETERS WHEN GRINDING AND SHARPENING OF BROACHING

Summary. *The article considers the problem of stabilization of quality indicators for grinding and sharpening broaches by controlling the temperature in the contact zone. The grinding process has a complex stochastic nature, which changes not only the parameters of the object, but also the technological system. Sharpening operations and fine grinding of workpieces is carried out in conditions of process variability parameters and processing environment. Variable working conditions of the abrasive tool structure and properties of the cooling fluid processing system, stiffness settings, ambient temperature, etc. Changing one parameter*

takes place over a period of processing one piece, the other – during the shift, the third – over a longer period. To enhance the stability of product quality it is necessary to fully exploit the technological capabilities of the finishing and fine grinding.

Key words: *grinding, intermittent grinding wheel, cutting tools, tool life, technological system.*

Постановка проблемы. Высокий уровень требований к современным режущим инструментам обусловил ряд проблем, связанных с созданием высокопроизводительных технологических процессов, обеспечивающих их изготовление с заданными параметрами качества, определяющими функциональную пригодность инструмента.

Анализ литературы. Отечественной и мировой наукой в настоящее время накоплен значительный объем теоретической и экспериментальной информации о физических процессах и явлениях, протекающих при формообразовании поверхностей. Сформулированы принципы технологической наследственности, изучено влияние на параметры качества способов обработки, геометрии и материалов режущих инструментов, режимов резания, смазочно-охлаждающих жидкостей и других технологических факторов. Исследованы физико-механические и химические явления процессов резания и износа инструмента, созданы новые эффективные инструментальные материалы, станки и способы обработких [1–3].

Применение новых способов получения заготовок, уменьшение припусков на механическую обработку, совершенствование конструкций абразивного инструмента, создание станков повышенной и особо высокой точности позволило расширить сферу использования процессов чистового и тонкого шлифования. Число станков, работающих абразивными инструментами, из года в год увеличивается и составляет в настоящее время на предприятиях инструментального производства 50–60% от общего парка металлорежущих станков [4; 5].

Среди режущего инструмента особое место занимает фасонный режущий инструмент: круглые и плоские протяжки, цельные и сборные червячные, а также дисковые и концевые фрезы, долбяки, осевой инструмент (сверла, зенкера, развертки), центровочные сверла и др. При их изготовлении используются в основном быстрорежущие стали типа Р18, Р6М5, Р6М5К5 и др. [6; 7]. Достижение хороших режущих свойств у этих сталей связано, однако, с некоторым снижением их обрабатываемости резанием, в частности шлифуемости.

Анализ конструктивных особенностей фасонного режущего инструмента и технологии его обработки показывает, что в процессе шлифования абразивным инструментом быстрорежущих сталей при нелинейной зоне контакта с обрабатываемой поверхностью в зоне резания создаются неблагоприятные термодинамические условия. Они становятся причиной появления дефектов шлифовочного характера в виде прижогов [8].

Принимая во внимание многогранность выполненных исследований, в то же время следует отметить, что до сих пор недостаточно изучен механизм формообразования поверхностей фасонного режущего инструмента, в частности протяжек. Для этих условий отсутствуют комплексные динамические модели, отражающие основные закономерности изменения параметров качества, что не позволяет создавать эффективные процессы финишной обработки, обеспечивающие выполнение заданных потребителем требований к инструменту с наименьшими затратами.

Цель работы – подбор режимов и характеристик круга, обеспечивающих температуру в зоне контакта ниже критических точек структурных превращений.

Изложение основного материала. Для достижения заданного качества в процессе шлифования применяются различные способы снижения температуры в зоне контакте (рис. 1).

В связи с низкой размерной стойкостью инструмента и появлением прижогов на обрабатываемых поверхностях приходится снижать режимы резания, осуществлять частую правку шлифовальных кругов, что неизбежно приводит к снижению производительности обработки [9].

Для снижения температуры в зоне резания применяют прерывистые, композиционные, высокопористые или высокоструктурные круги [10].

В работе [11] дана экспериментальная оценка эффективности применения прерывистых кругов при заточке фасонных фрез и зуборезных долбяков на основе сравнительных стойкостных испытаний фасонных фрез из быстрорежущей стали Р9К10, заточенных обычным 24А25М3К6 и прерывистым 24А25СМ2К6 (l_1 = 45 мм, l_2 = 10 мм, z = 10) кругами 2Т175х20х32 со следующими режимами: частота вращения шпиндели 1600 об/мин, продольная подача 0,2 м/с, поперечная подача 0,01…0,015 мм/дв. ход. с последующим выхаживанием без охлаждения, снимаемый припуск при переточке – 0,5…0,8 мм. Обработка инструмента прерывистым кругом позволила снизить высоту шероховатости зубьев с 1,8 до 1,2 мкм, на заточенных поверхностях отсутствовали цвета побежалости, завалы режущих кромок и нарушения геометрии зубьев фрез.

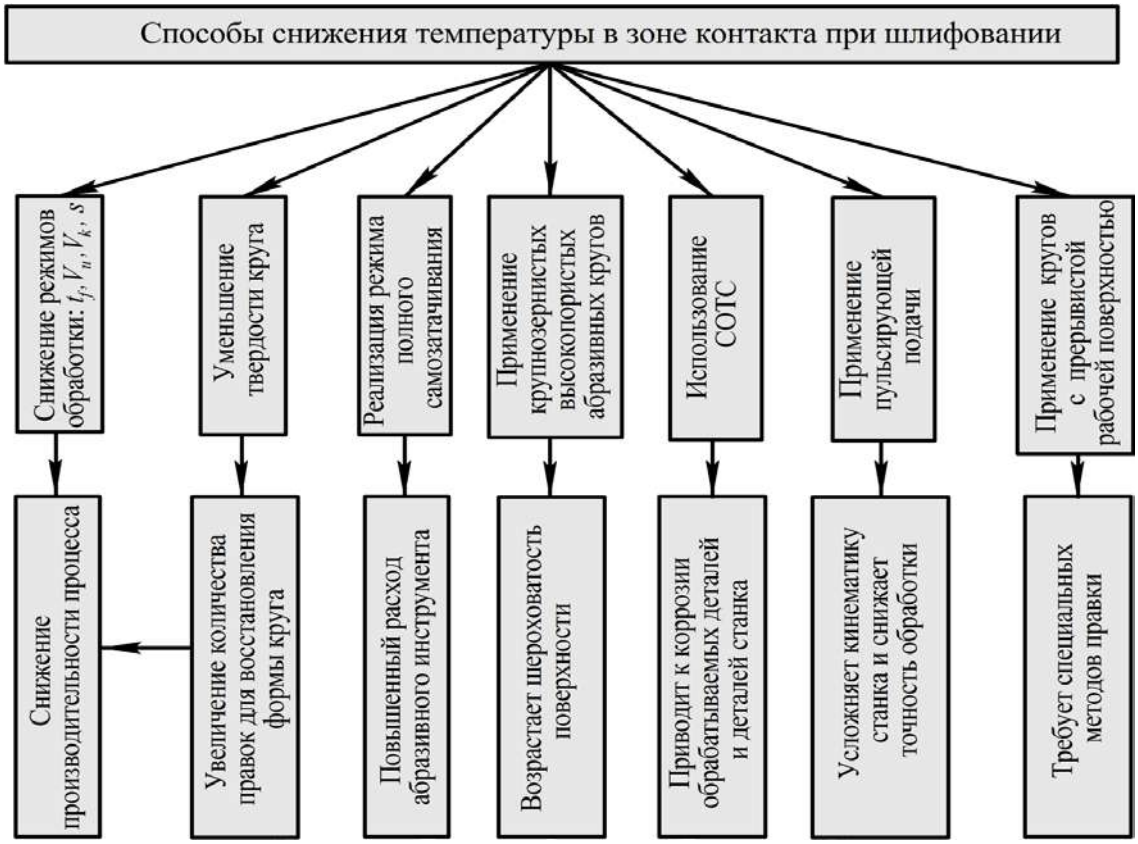


Рис. 1. Способы снижения температуры в зоне резания.

Результаты сравнительных испытаний показали, что при применении кругов с прерывистой рабочей поверхностью стойкость инструмента существенно возрастает. Приведенный пример позволяет сделать заключение о целесообразности использования прерывистых кругов для заточки инструмента.

За период стойкости инструмента параметры технологической системы под действием различных факторов могут изменяться с течением времени предсказуемым и непредсказуемым образом. Важным показателем качества технологических систем (ТС) обработки деталей, особенно ТС финишных операций, является их стабильность, отсутствие стабильности при традиционных технологиях неизбежно приводит к разбросу показателей качества выпускаемой продукции (рис. 2).

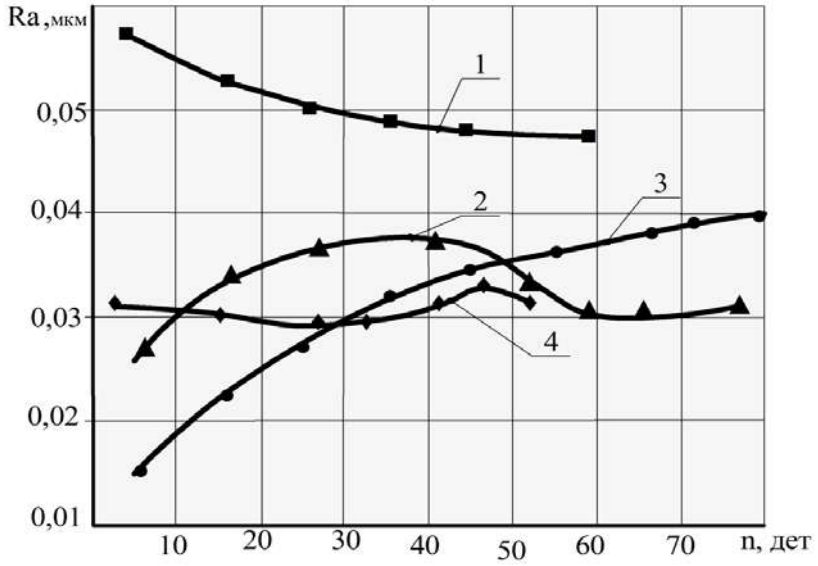


Рис. 2. Изменение шероховатости поверхности зубьев протяжек из стали Р6М5 при шлифовании кругами: 1 – 14 63х15х36 14AF54M7V; 2 – 24 63х15х36 37AF54M7V; 3 – 14 55х15х36 33AF54К7V; 4 – 14 63х15х36 14AF54L7V. Режим шлифования: V_k =22 м/с; V_u = 0,17 м/с; S_n = 7 мкм/с.

Согласно общепринятым представлениям (например [12]) под стабильностью понимают свойство технологического процесса сохранять показатели качества изготовления продукции в заданных пределах в течение некоторого промежуточного времени.

Следовательно,

$$\left|y_k(\tau_0) - y_k(\tau_f)\right| \le \varepsilon_k \text{ при } \tau \in (\tau_0 - \tau_f), \qquad (1)$$

где ε_k – заданный предел изменения k-го показателя качества,

$(\tau_0 - \tau_f)$ – заданный интервал времени, в течение которого должны сохраняться показатели качества.

Эти показатели должны находиться в пределах заданного поля допуска

$$y_{k\min} \le y_k(\tau_f) \le y_{k\max}.$$

Неравенство (1) гарантированно выполняется при условии

$$\left|\frac{dy_k}{d\tau}\right| \le \delta_k, \qquad (2)$$

где $\delta_k = \dfrac{\varepsilon_k}{\tau_f - \tau_0}$ – ограничение по скорости изменения параметра y_k.

Причинами, вызывающими изменение y_k, являются внешние воздействия на технологический процесс, т. е. векторов воздействий $U(\tau)$; $X(\tau)$; $\Omega(\tau)$, и начальные условия состояния $Z(\tau_0)$. В силу того, что $\Omega(\tau)$ является неизмеряемым, то его компоненты могут считаться случайными функциями, результат воздействия которых приводит к случайным отклонениям от номинальных значений y_k и, следовательно, появлению элементов случайности в показателях качества.

В соответствии с ГОСТ 15895-77, для такого случая критерием стабильности служит среднеквадратичное отклонение контролируемого параметра σ_{yk}, т. е.

$$\sigma_{y_k} \le \sigma_{y_{k\max}}. \qquad (3)$$

Обеспечение стабильности соответствующих показателей производится за счет выбора компонент вектора $U(\tau)$. Считается, что рациональными являются такие параметры управления $U(\tau)$, которые обеспечивают положение центра рассеивания y_k внутри поля допуска ($y_{k\min}$, $y_{k\max}$) на таком уровне y_{k0} (рис. 3), который минимизирует вероятность появления бракованных деталей [13]. Обычно указанную задачу решают путем соответствующей фиксированной настройки станка $U_0^*(\tau_0)$, обеспечивавшей заданные параметры в течение максимально достижимого интервала времени [14].

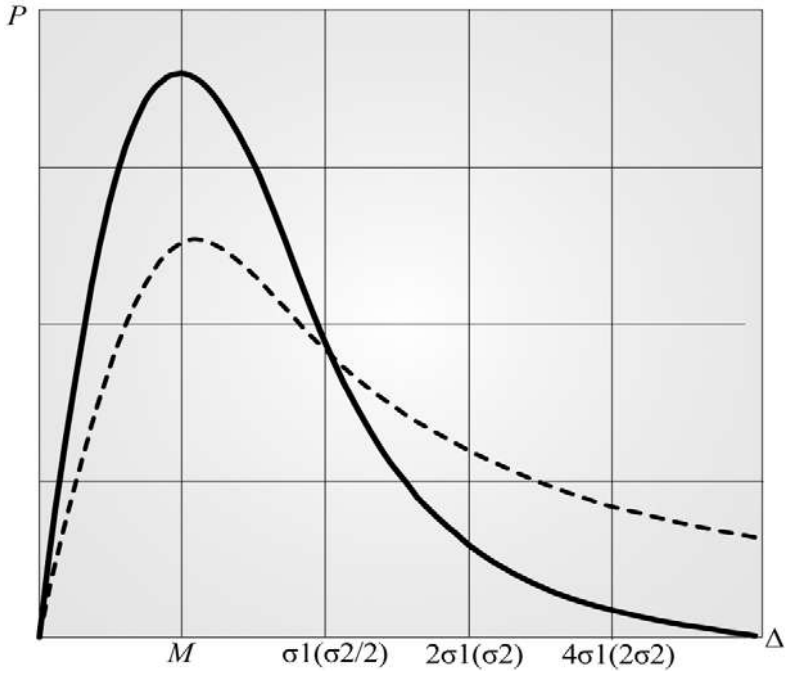


Рис. 3. Изменение положение центра рассеяния внутри поля допуска при различных параметрах настройки.

Наличие существенных колебаний в отклонениях расположения и шероховатости поверхности можно объяснить наличием в технологических процессах существенных возмущающих воздействий $\Omega(\tau)$, вызванных нестабильностью технологического процесса, в том числе и за счет того, что часть доступных измерению параметров $X(\tau)$ считается равной $X(\tau_0)$, и не выполняются условия (2).

Фактически при обработке каждой новой заготовки параметры процесса $Z(\tau)$ принимают новые значения. Это соответствует смещению центра рассеивания относительно поля допуска и выходит за рамки ограничения (1).

Указанный недостаток может быть устранен путем уменьшения интервала ($\tau_0 - \tau_f$) задания $U_0^*(\tau_0)$, т. е. более частой настройкой параметров технологического процесса, и представляет алгоритм управления технологическим процессом с периодическим восстановлением параметров. Например, обычно шлифовальный круг правят после обработки определенного количества заготовок.

Также возможно обеспечить стабильность по некоторым заданным параметрам y_i при $z_i(\tau)$ = const выбором $U_1^*(\tau_0)$ за счет более быстрого изменения «маловлиятельных» состояний $z_j(\tau)$ = var. Например, для чернового шлифования считаются целесообразными такие $U_1^*(\tau_0)$, при которых круг работает в режиме самозатачивания. Недостатком рассмотренного является повышенная скорость изменения «маловлиятельного» состояния $z_j(\tau)$, которая может привести к выходу из поля допусков других показателей качества y_j и, в соответствии с (2), – снижению и потере стабильности по этим факторам.

При определении необходимых параметров $U_1^*(\tau_0)$ для таких методов обеспечения стабильности качества обычно достаточно поведенческого описания технологического процесса.

Все вышеперечисленные алгоритмы не обеспечивают одновременную стабилизацию параметров качества в условиях случайных возмущений $\Omega(\tau)$, что недопустимо для операций чистового и тонкого шлифования, для которых допуски ε_k являются малыми величинами.

При проектировании технологических процессов абразивно-алмазной обработки за основу берутся детерминированные модели, по которым рассчитывается традиционные или традиционно-граничные циклы шлифования, осуществляется обработка партии заготовок, после чего систему перестраивают на обработку другого типоразмера или вида. В результате этого технологический процесс осуществляется с применением традиционных режимов резания, способов диагностики и управления.

Вместе с тем процессы шлифования имеют сложную стохастическую природу. В процессе резания изменяются параметры не только объекта, но и самой ТС. Это приводит к нестабильности качества изделий и не позволяет в полной мере использовать значительные технологические возможности чистового и тонкого шлифования как финишной операции.

На операциях заточки и тонкого шлифования обработка заготовок выполняется в условиях непостоянства параметров технологической системы обработки и окружающей среды. Изменяется состояние рабочей поверхности абразивного инструмента, состав и свойства СОТС, параметры жесткости технологической системы, температура окружающей среды и т. д. Изменение одних параметров протекает за период обработки одной детали, других – в течение смены, третьих – в течение более длительного периода.

Для условий $Z(\tau)$ = var вектор управления $U^*(\tau)$ должен выбираться с учетом изменения $Z(\tau)$, и для каждой детали (или ее элемента) m необходимо подбирать новое управление $U_m^*(\tau)$.

Выводы. Предложен алгоритм снижения температуры в зоне контакта для обеспечения стабильности параметров качества поверхностей при шлифовании на основе системного анализа операции, отражающей взаимодействие ее состояний $Z(\tau)$.

Изучены основные закономерности процессов формообразования поверхностей и разработаны научно обоснованные подходы для создания комплексных динамических моделей получения оптимальных конструкций абразивного инструмента.

ЛИТЕРАТУРА

1. Абразивная и алмазная обработка материалов. Справочник / под ред. проф. А. Н. Резникова. – М. : Машиностроение, 1977. – 390 с.
2. Новоселов Ю. К. Динамика формообразования поверхностей при абразивной обработке / Ю. К. Новоселов. – Севастополь : СевНТУ, 2012. – 304 с.
3. Tribology of abrasive machining processes / [Ioan D. Marinescu, W. Brian Rowe, Boris Dimitrov, Ichiro Inasaki] / Norwich, NY : William Andrew, Inc., 2004. – 764 p.
4. Анализ рынка станков для обработки материалов в России в 2008–2012 гг., прогноз 2013–2017 гг. [Электронный ресурс]. – Режим доступа : http://businesstat.ru/russia/engineering/engineering_tools/.
5. Бессарабова Т. М. Парки металлообрабатывающего оборудования США, ФРГ, Великобритании, Японии, Франции и Италии : обзор / Т. М. Бессарабова, Ф. Б. Любомирская, И. А. Яменева. – М. : ВНИИТЭМР, 1991. – 80 с.
6. Зубарев Ю. М. Современные инструментальные материалы / Ю. М. Зубарев. − СПб. : Лань, 2008. – 224 с.
7. Инструментальные материалы / [Г. А. Воробьева, Е. Е. Складнова, А. Ф. Леонов, В. К. Ерофеев]. – СПб. : Политехника, 2005. – 268 с.
8. Палей М. М. Технология шлифования и заточки режущего инструмента / М. М. Палей, Л. Г. Дибнер, М. Д. Флид. – М. : Машиностроение, 1988. – 288 с.
9. Кулаков Ю. М. Предотвращение дефектов при шлифовании / Ю. М. Кулаков, В. А. Хрульков, И. В. Дунин-Барковский. – М. : Машиностроение, 1975. – 144 с.

10. Дворин Ю. М. Разработка бесприжоговой технологии шлифования фасонного инструмента из безвольфрамовых быстрорежущих сталей : автореф. дис. … канд. техн. наук : спец. 05.02.08 «Технология машиностроения» / Ю. М. Дворин. – М., 2003. – 20 с.
11. Исследование процессов шлифования сложнорежущего инструмента из быстрорежущей стали Р6М5 : отчет о НИР. – Одесса : ОПИ, 1974.
12. Рыжов Э. В. Технологическое обеспечение эксплуатационных свойств деталей машин / Э. В. Рыжов, А. Г. Суслов, В. П. Федоров. – М. : Машиностроение, 1979. – 176 с.
13. Ларшин В. П. Статистический контроль работоспособности технологических систем по критерию стабильности / В. П. Ларшин // Физические и компьютерные технологии в народном хозяйстве : труды 5-й международной научно-технической конференции ХНПК «ФЭД». – Харьков, 2002 – С. 31–32.
14. Ларшин В. П. Интегрированная технологическая система шлифования сложнопрофильных деталей : автореф. дис. ... докт. техн. наук. : спец. 05.02.08 «Технология машиностроения» / В. П. Ларшин. – Одесса, 1995. – 33 с.

Раздел 3. СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННОЕ МАШИНОСТРОЕНИЕ

УДК 631.316.27

Бабицкий Л. Ф., Куклин В. А.

ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ ОБОСНОВАНИЕ ПАРАМЕТРОВ ПОДПРУЖИНЕННОЙ КУЛЬТИВАТОРНОЙ ЛАПЫ

Аннотация. *В статье описывается теоретическое обоснование параметров подпружиненной культиваторной лапы. Приведены выражения, которые дают возможность определять амплитудно-частотную характеристику подпружиненного рабочего органа при обработке почвы. Предложена конструктивная схема рабочего органа культиватора с упругой S-образной стойкой и дополнительной пружиной, для которых составлены уравнение движения и приведены их решения. Полученные теоретические зависимости позволяют определять амплитуду и частоту колебаний подпружиненной культиваторной лапы. Получены зависимость по определению жесткости пружины*

Ключевые слова: *обработка почвы, культиваторная лапа, упругая подпружиненная стойка, уравнение движения, амплитуда, частота.*

Бабицький Л. Ф., Куклін В. А.

ТЕОРЕТИЧНЕ ОБҐРУНТУВАННЯ ПАРАМЕТРІВ ПІДПРУЖИНЕНОЇ КУЛЬТИВАТОРНОЇ ЛАПИ

Анотація. *У статті описується теоретичне обґрунтування параметрів підпружиненої культиваторної лапи. Наведено вирази, які дають можливість визначати амплітудно-частотну характеристику підпружиненого робочого органу при обробці ґрунту. Запропоновано конструктивну схему робочого органу культиватора з пружною S-подібною стійкою та додатковою пружиною, для яких складено рівняння руху й наведено їх розв'язання. Отримані теоретичні залежності дозволяють визначати амплітуду і частоту коливань підпружиненої культиваторної лапи.*

Ключові слова: *обробка ґрунту, культиваторна лапа, пружний підпружинений стояк, рівняння руху, амплітуда, частота.*

Babytskyy L. F., Kuklin V. A.

THEORETICAL BASIS OF SPRING LOADED CULTIVATOR TOOTH PARAMETERS

Summary. *The paper describes the theoretical basis of spring-loaded cultivator tooth parameters. The expressions that give the possibility to determine the frequency response of a spring-loaded working organ in cultivation are offered. The article proposes constructive scheme of working body of cultivator with elastic S-shaped bar and additional spring for which the equation of motion is written and its solution is presented. The theoretical dependences allow determining the amplitude and frequency of vibrations of a spring-loaded cultivator tooth. The dependence on the definition of the spring in the process cultivator legs and oscillation frequency, which is equal to the frequency of soil cultivation, is also revealed in the paper. Differential equation of motion under the action of teeth periodically varying resistance force proportional to the displacement of the soil and the elastic forces of the springs and struts are compiled. Derived expressions allow determining the frequency response of a spring-loaded working organ in cultivation.*

Key words: *soil tiling, resilient spring-loaded rack, the equation of motion, amplitude, frequency.*

Постановка проблемы. Обработка почвы – самый энергоемкий процесс в современном сельскохозяйственном производстве [1]. Постоянный рост цен на топливо и сложная экономическая ситуация в стране вынуждают искать новые пути снижения затрат при возделывании сельскохозяйственных культур. Совершенствование конструкций применяемых почвообрабатывающих агрегатов может идти по пути использования вибрационного воздействия на почву за счет применения подпружиненных рабочих органов.

Анализ литературы. Установлено, что при вибрировании рабочего органа в почве тяговое сопротивление орудия снижается на 20–60% в зависимости от параметров вибрации (частоты, амплитуды) и поступательной скорости движения. При этом, по данным исследователей, общие энергозатраты уменьшаются в среднем на 30% [2].

Доктором технических наук О. В. Верняевым выполнены теоретические и экспериментальные исследования влияния вынужденных

колебаний лап культиватора на энергетические и качественные показатели обработки почвы [3]. Однако использование вынужденных колебаний требует дополнительных энергозатрат на принудительный привод.

Применение почвообрабатывающих машин с упругой подвеской рабочих органов без принудительного привода глубоко рассмотрено в работах Г. А. Рябцева [4]. Им обоснованы параметры упругой подвески рабочих органов на основе изучения основных фаз деформации и разрушения почвы.

Цель статьи – теоретическое обоснование параметров подпружиненной культиваторной лапы.

Изложение основного материала. В предложенной конструкции (рис. 1) культиваторная лапа крепится на упругой S-образной стойке, которая дополнительно подпружинена.

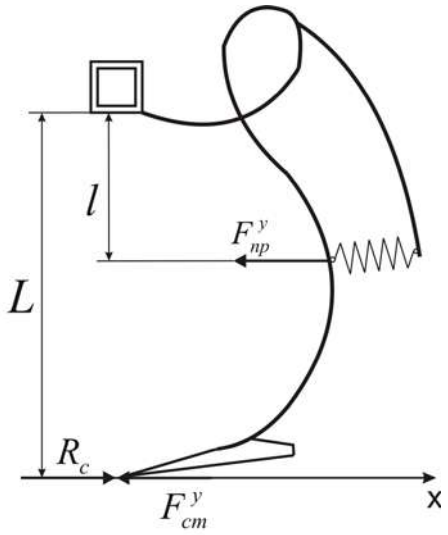


Рис. 1. Схема сил, действующих на лапу.

Составим дифференциальное уравнение движения лапы под действием периодически изменяющейся силы сопротивления почвы R_c и пропорциональных перемещению сил упругости пружины $F^y_{\text{пр}}$ и стойки $F^y_{\text{ст}}$.

$$m\ddot{x} = R_c - \frac{l}{L}F^y_{\text{пр}} - F^y_{\text{ст}}. \qquad (1)$$

При незначительной величине амплитуды колебаний стойки можно принять $F^y_{\text{ст}} = c_{\text{пр}} \cdot x$. Силу сопротивления почвы принимаем изменяющейся по синусоидальному закону $R_{\max} \cdot \sin\omega t$.

$$m\ddot{x} = R_{max} \cdot \sin\omega t - \frac{l}{L} \cdot c_{пр} \cdot x - c_{ст} \cdot x =$$

$$= R_{max} \cdot \sin\omega t - \left[\frac{l}{L} \cdot c_{пр} + c_{ст}\right] \cdot x, \qquad (2)$$

где $c_{\text{пр}}$ – коэффициент жесткости пружины;
$c_{\text{ст}}$ – коэффициент жесткости упругой стойки;
x – перемещение носка лапы.

Разделим левую и правую части уравнения на m и введём следующие обозначения:

$$\frac{R_{\max}}{m} = R_0 \text{ и } \frac{\left[\frac{l}{L} \cdot c_{\text{пр}} + c_{\text{ст}}\right]}{m} = \frac{c_{\text{общ}}}{m} = A, \qquad (3)$$

Тогда уравнение примет вид:

$$\ddot{x} + Ax = R_0 \cdot \sin\omega t. \qquad (4)$$

Из теории дифференциальных уравнений известно, что общее решение уравнения вида (3) можно представить в виде суммы двух решений [5]:

$$x = x_1 + x_2, \qquad (5)$$

где x_1 – общее решение линейного однородного дифференциального уравнения;
x_2 – частное решение линейного неоднородного дифференциального уравнения.

Общее решение уравнения (4) будет иметь вид [5]:

$$x = C_1 \cos(\sqrt{A} \cdot t) + C_2 \sin(\sqrt{A} \cdot t) + \frac{R_0 \cdot \sin\omega t}{A - \omega^2}, \quad (6)$$

где C_1, C_2 – постоянные интегрирования.

В начальный момент времени $t = 0$ перемещение $x = 0$. Подставляя эти значения в уравнение (6), получим:

$$0 = C_1 \cos 0 + C_2 \sin 0 + \frac{R_0 \cdot \sin 0}{A - \omega^2},$$

откуда $C_1 = 0$.

В момент времени равный половине периода колебаний $t = \frac{T}{2} = \frac{\pi}{\omega}$ перемещение x равно приведенной к носку лапы максимальной величине сжатия d пружины: $x = d \cdot \frac{L}{l}$.

Подставляя эти значения в уравнение (6) и учитывая, что $C_1 = 0$, получим выражение для расчета постоянной интегрирования C_2:

$$d \cdot \frac{L}{l} = 0 \cdot \cos\left(\sqrt{A} \cdot \frac{\pi}{\omega}\right) + C_2 \sin\left(\sqrt{A} \cdot \frac{\pi}{\omega}\right) + \frac{R_0 \cdot \sin\left(\omega \cdot \frac{\pi}{\omega}\right)}{A - \omega^2},$$

$$C_2 = \frac{d \cdot L}{l \cdot \sin\left(\sqrt{A} \cdot \frac{\pi}{\omega}\right)}.$$

Подставляя выражения для C_1 и C_2 в уравнение (6), получим:

$$x = \frac{d \cdot L}{l \cdot \sin\left(\sqrt{A} \cdot \frac{\pi}{\omega}\right)} \sin(\sqrt{A} \cdot t) + \frac{R_0 \cdot \sin\omega t}{A - \omega^2}. \quad (7)$$

Дифференцированием выражения (7) найдем закон изменения скорости движения:

$$\dot{x} = \frac{d \cdot L \cdot \sqrt{A}}{l \cdot \sin\left(\sqrt{A} \cdot \frac{\pi}{\omega}\right)} \cos(\sqrt{A} \cdot t) + \frac{R_0 \cdot \omega \cdot \cos\omega t}{A - \omega^2}. \quad (8)$$

В момент удара $t = \frac{\pi}{\omega}$, тогда

$$V_{уд} = \dot{x}\left(\frac{\pi}{\omega}\right) = \frac{d \cdot L \cdot \sqrt{A}}{l \cdot \sin\left(\sqrt{A} \cdot \frac{\pi}{\omega}\right)} \cos(\sqrt{A} \cdot \frac{\pi}{\omega}) + \frac{R_0 \cdot \omega \cdot \cos\pi}{A - \omega^2} = \frac{d \cdot L \cdot \sqrt{A}}{l} \operatorname{ctg}\left(\sqrt{A} \cdot \frac{\pi}{\omega}\right) - \frac{R_0 \cdot \omega}{A - \omega^2} \quad (9)$$

Ударный импульс равен:

$$P_{уд} = m \cdot V_{уд}. \quad (10)$$

На основании закона сохранения импульса запишем:

$$F_{ср}^{уд} \cdot t = m \cdot V_{уд}. \quad (11)$$

Считая, что при взаимодействии сила удара линейно возрастает до максимального значения $F_{ск}$, при котором происходит скалывание блока почвы, можно принять $F_{ср}^{уд} = \frac{F_{ск}}{2}$.

Выразим скорость удара из выражения (11) и подставим в уравнение (9):

$$\frac{F_{ск} \cdot t}{2m} = \frac{d \cdot L \cdot \sqrt{A}}{l} \operatorname{ctg}\left(\sqrt{A} \cdot \frac{\pi}{\omega}\right) - \frac{R_0 \cdot \omega}{A - \omega^2}.$$

Выполнив преобразования с учетом введенных обозначений (3), получим выражение для расчета величины сжатия пружины *d*:

$$d = \left(\frac{F_{ск} \cdot t}{2 \cdot m} + \frac{R_{max} \cdot \omega}{c_{общ} - m \cdot \omega^2}\right) \cdot \frac{l}{L \cdot \sqrt{\frac{c_{общ}}{m}}} \cdot \operatorname{tg}\left(\sqrt{\frac{c_{общ}}{m}} \cdot \frac{\pi}{\omega}\right). \quad (12)$$

Амплитуда колебаний равна:

$$A = \frac{L}{l} \cdot \left[\left(\frac{F_{ск} \cdot t}{2 \cdot m} + \frac{R_{max} \cdot \omega}{c_{общ} - m \cdot \omega^2}\right) \cdot \frac{l}{L \cdot \sqrt{\frac{c_{общ}}{m}}} \cdot \operatorname{tg}\left(\sqrt{\frac{c_{общ}}{m}} \cdot \frac{\pi}{\omega}\right)\right]. \quad (13)$$

В процессе работы культиваторной лапы частота колебаний будет равна частоте скалывания почвы:

$$f = \frac{V}{l_{ск}}, \quad (14)$$

где V – скорость поступательного движения культиваторной лапы;

$l_{ск}$ – длина участка скалывания почвы.

Приведенные выражения дают возможность определять амплитудно-частотную характеристику подпружиненного рабочего органа при обработке почвы.

Выводы. Для предложенной конструктивной схемы рабочего органа культиватора с упругой S-образной стойкой и дополнительной пружиной составлено уравнение движения и дано его решение. Полученные теоретические зависимости позволяют определять амплитуду и частоту колебаний подпружиненной культиваторной лапы.

ЛИТЕРАТУРА

1. Погорілий Л. В. Сучасні проблеми землеробської механіки і машинознавства при створенні сільськогосподарської техніки нового покоління / Л. В. Погорілий // Техніка АПК. – 2003. – № 11. – С. 4–7.
2. Калюжный Г. Д. Исследование работы вибрационного корпуса плуга / Г. Д. Калюжный, М. М. Гойхман // Механизация и электрификация социалистического сельского хозяйства. – 1964. – № 5. – С. 45–46.
3. Верняев О. В. Активные рабочие органы культиваторов / О. В. Верняев. – М. : Машиностроение, 1983. – 79 с.
4. Рябцев Г. А. Технологические основы применения почвообрабатывающих машин с упругой подвеской рабочих органов : автореф. дис. … докт. техн. наук : спец. 05.20.01 / Г. А. Рябцев. – Воронеж, 1973. – 57 с.
5. Выгодский М. Я. Справочник по высшей математике / М. Я. Выгодский. – [10-е изд., стер.]. – М. : Наука, 1972. – 872 с.

УДК 631.313.5

Бабицкий Л. Ф., Соболевский И. В., Куклин В. А.

ОБОСНОВАНИЕ ОПТИМАЛЬНОЙ ФОРМЫ ИГЛ ПОЧВООБРАБАТЫВАЮЩИХ ИГОЛЬЧАТЫХ ДИСКОВ

Аннотация. *В статье дано теоретическое обоснование оптимальной формы игл игольчатых дисков для поверхностной обработки почвы. На основании кинематического анализа движения игольчатого диска получены теоретические зависимости по обоснованию оптимального угла вхождения*

иглы в почву. Разработана методика проектирования профиля иглы по форме логарифмической спирали. Получена графическая интерпретация теоретических зависимостей, в которых отражено, что с уменьшением глубины обработки иглы приближаются к прямолинейной форме.

Ключевые слова: *обработка почвы, игольчатый диск, циклоида, скорость, форма иглы.*

Бабицький Л. Ф., Соболевський І. В., Куклін В. А.

ОБҐРУНТУВАННЯ ОПТИМАЛЬНОЇ ФОРМИ ГОЛОК ҐРУНТООБРОБНИХ ГОЛЧАСТИХ ДИСКІВ

Анотація. *У статті дано теоретичне обґрунтування оптимальної форми голок голчастих дисків для поверхневої обробки ґрунту. На підставі кінематичного аналізу руху голчастого диска отримано теоретичні залежності щодо обґрунтування оптимального кута входження гілки в ґрунт. Розроблено методику проектування профілю гілки за формою логарифмічної спіралі. Отримано графічну інтерпретацію теоретичних залежностей, у яких відображено, що із зменшенням глибини обробки гілки наближаються до прямолінійної форми.*

Ключові слова: *обробка ґрунту, голчастий диск, циклоїда, швидкість, форма гілки.*

Babytskiy L. F., Sobolevskiy I. V., Kuklin V. A.

RATIONALE FOR BEST FORM OF NEEDLES OF SOIL TILLING WHEEL SPIDER

Summary. *In this paper we give a theoretical justification of the optimal form of needles for the needle discs for tillage. Basing on kinematic analysis of movement of the wheel spider we received the theoretical justification depending on the optimum angle of the needle entry into the soil, which depends on the disk radius and depth of processing, and does not depend on the speed of the wheel spider. Given the location of the instantaneous center of rotation the absolute angular speed of rotation of the needle drive is found. The technique of designing the profile of the needle on a logarithmic spiral is received.*

According to the definition of the design scheme of the needle entry angle into the ground rolling without slipping a disc needle trajectory of the needle point of contact with the ground will be a cycloid. A graphical interpretation of the theoretical curves which reflect that while decreasing the depth of processing the needles approach a straightforward manner is specified.

Key words: *soil tillage, wheel spider, cycloid, speed, needle shape.*

Постановка проблемы. Ротационные рабочие органы, в частности игольчатые диски, широко применяются в современных системах минимальной обработки почвы и экологического земледелия [1; 2]. Снижение энергоемкости поверхностной обработки почвы в сложных современных экономических условиях является важнейшей задачей.

Анализ литературы. Теоретическим исследованиям игольчатых рабочих органов посвящен ряд работ (например [3; 4]), в то же время вопрос снижения энергоемкости поверхностной обработки почвы путем обоснования рациональной формы игл игольчатых дисков исследован недостаточно.

Цель статьи – теоретическое обоснование оптимальной формы игл игольчатых дисков для поверхностной обработки почвы.

Изложение основного материала. Для обеспечения минимальных энергозатрат при работе игольчатых дисков необходимо применять диски с криволинейными иглами, касательная к профилю иглы которых в точке A в момент вхождения иглы в почву должна совпадать с вектором скорости $V_{абс}$ (см. рис. 1).

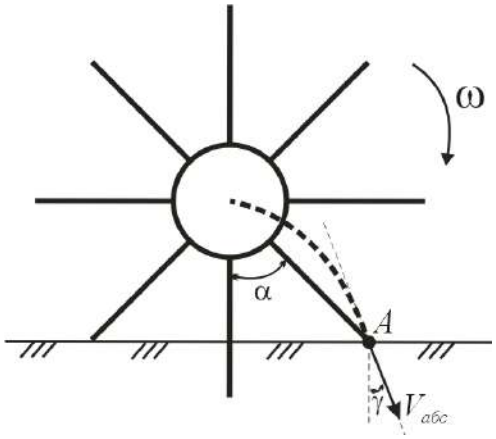


Рис. 1. Схема работы игольчатого диска.

При качении игольчатого диска без проскальзывания траектория движения точки иглы A будет представлять собой циклоиду [5]. Момент вхождения иглы в почву характеризуется углом α (рис. 2). Абсолютная скорость $V_{абс}$ точки иглы A будет равна векторной сумме поступательной скорости движения диска V и скорости вращательного движения U относительно оси вращения игольчатого диска [6]:

$$\vec{V}_{абс} = \vec{V} + \vec{U} . \qquad (1)$$

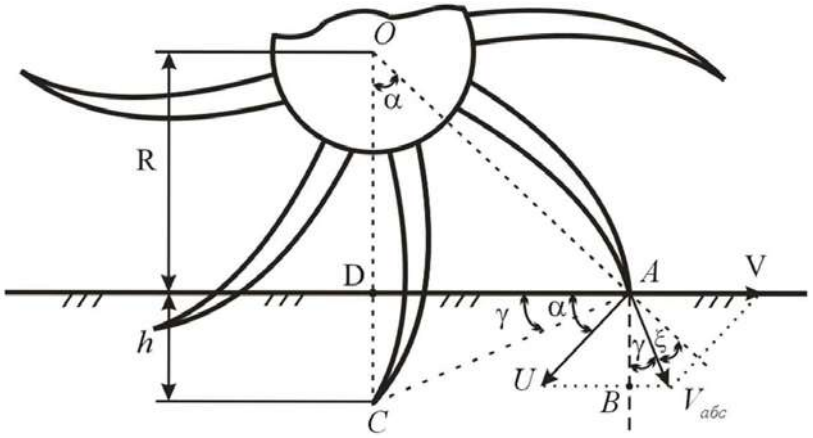


Рис. 2. Расчетная схема к определению угла вхождения иглы в почву.

Используя теорему косинусов, найдем значение абсолютной скорости:

$$V_{абс} = \sqrt{V^2 + U^2 + 2 \cdot V \cdot U \cdot \cos(\pi - \alpha)} . \qquad (2)$$

Считая, что мгновенный центр вращения расположен в точке *C* [3], получим

$$V = U. \qquad (3)$$

Из рис. 2 следует, что

$$\cos\alpha = \frac{R}{R+h}, \qquad (4)$$

а с учетом тригонометрических преобразований $\cos(\pi - \alpha) = -\cos\alpha = -\frac{R}{R+h}$.

В результате из выражения (2) получим:

$$V_{абс} = \sqrt{V^2 + V^2 - 2 \cdot V \cdot V \cdot \frac{R}{R+h}} = \sqrt{2} \cdot V \cdot \sqrt{1 - \frac{R}{R+h}} . \qquad (5)$$

Из треугольника $AB\vec{V}_{абс}$ отрезок *AB* равен $AB = V_{абс} \cdot \cos\gamma$.

Из треугольника $AB\vec{U}$ отрезок *AB* равен $AB = U \cdot \sin\alpha$, тогда $V_{абс} \cdot \cos\gamma = U \cdot \sin\alpha$.

$$\cos\gamma = \frac{U}{V_{абс}} \cdot \sin\alpha . \qquad (6)$$

С учетом выражений (3), (4) и (5) и учитывая, что $\sin\alpha = \sqrt{1 - \cos^2\alpha}$, формула (6) будет иметь вид:

$$\cos\gamma = \frac{U}{V_{абс}} \cdot \sin\alpha = \frac{\sqrt{1 - \left(\frac{R}{R+h}\right)^2}}{\sqrt{2} \cdot \sqrt{1 - \frac{R}{R+h}}} = \frac{\sqrt{1-\psi^2}}{\sqrt{2} \cdot \sqrt{1-\psi}}, \qquad (7)$$

где $\psi = \frac{R}{R+h}$.

Данную зависимость можно получить и другим способом. Считая, что мгновенный центр вращения находится в точке *C* [3], найдем абсолютную угловую скорость вращения игольчатого диска:

$$\omega_{абс} = \frac{V}{R+h} . \qquad (8)$$

Абсолютная скорость точки иглы *A*, соответственно, равна:

$$V_{абс} = \omega_{абс} \cdot AC. \qquad (9)$$

Из прямоугольного треугольника *AOD* найдем:

$$AD = \sqrt{(R+h)^2 - R^2} . \qquad (10)$$

Рассматривая прямоугольный треугольник *ADC*, получим:

$$AC = \sqrt{(CD)^2 + (AD)^2} = \sqrt{h^2 + (R+h)^2 - R^2} . \qquad (11)$$

$$\cos\gamma = \frac{AD}{AC} = \frac{\sqrt{(R+h)^2 - R^2}}{\sqrt{h^2 + (R+h)^2 - R^2}} = \frac{\sqrt{1 - \left(\frac{R}{R+h}\right)^2}}{\sqrt{2} \cdot \sqrt{1 - \frac{R}{R+h}}} = \frac{\sqrt{1-\psi^2}}{\sqrt{2} \cdot \sqrt{1-\psi}} . \qquad (12)$$

Угол вхождения иглы в почву γ зависит от радиуса диска и глубины обработки и не зависит от скорости движения игольчатого диска.

Для построения профиля иглы в точке *A* необходимо провести касательную под углом ξ (рис. 3).

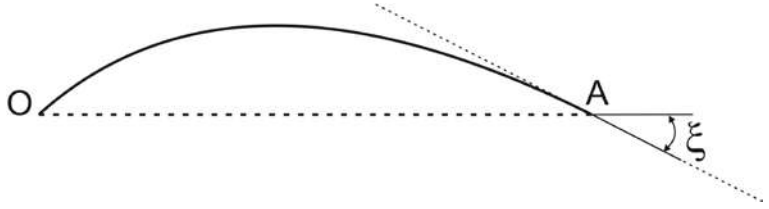


Рис. 3. Схема к построению профиля иглы.

$$\xi = \alpha - \gamma = \arccos(\psi) - \arccos\left(\frac{\sqrt{1-\psi^2}}{\sqrt{2}\cdot\sqrt{1-\psi}}\right), \quad (13)$$

где $\psi = \frac{R}{R+h}$.

Дальнейшее построение профиля иглы выполняется по форме логарифмической спирали в соответствии с известной методикой [7].

Анализируя графическую интерпретацию зависимости (13) (рис. 4), можно сделать вывод, что с уменьшением глубины обработки (возрастание величины ψ) угол ξ уменьшается, и при h = 0 угол ξ = 0 (т. е. иглы приближаются к прямолинейной форме). При возрастании глубины обработки (уменьшение величины ψ) угол ξ возрастает.

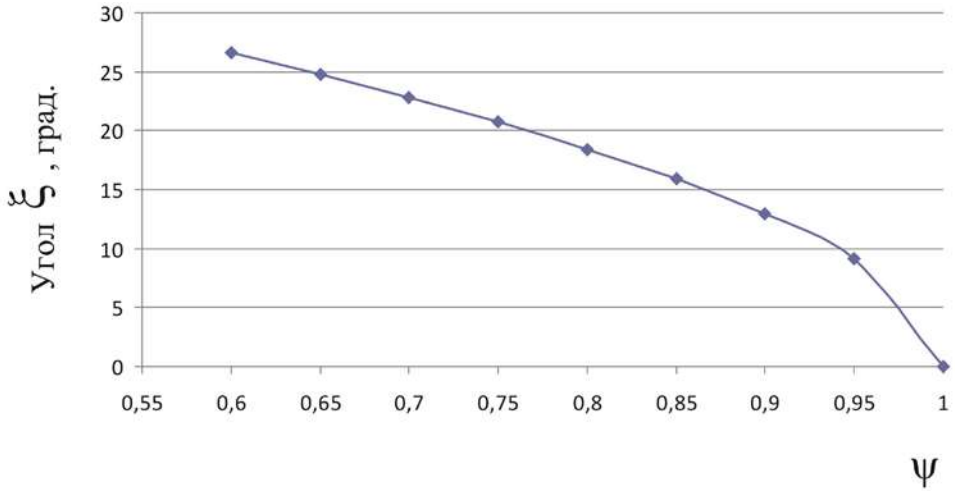


Рис. 4. Зависимость угла ξ от ψ.

Расчет, выполненный для стандартного игольчатого диска диаметром 550 мм, показывает, что при увеличении глубины обработки от 4 до 6 см угол ξ возрастает от 11° до 13,5° (рис. 5).

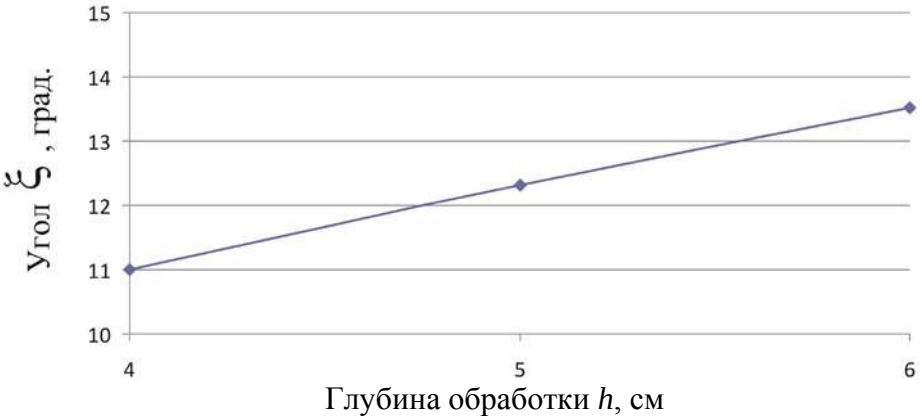


Рис. 5. Зависимость угла ξ от глубины обработки *h* для игольчатого диска диаметром 550 мм.

Выводы. На основании кинематического анализа движения игольчатого диска получены теоретические зависимости по обоснованию оптимального угла вхождения иглы в почву. Разработана методика проектирования профиля иглы по форме логарифмической спирали.

ЛИТЕРАТУРА

1. Позняк С. С. Экологическое земледелие : монография / С. С. Позняк, Ч. А. Романовский ; [под общ. ред. к.с.-х.н. С. С. Позняка]. – Минск : МГЭУ им. А. Д. Сахарова, 2009. – 327 с.
2. Ґрунтозахисна біологічна система землеробства в Україні / [М. К. Шикула, С. С. Антонець, А. Д. Балаєв та ін.]. – К. : Вид. центр Нац. аграрн. ун-ту, 2000. – 387 с.
3. Кравчук В. О качении дисков игольчатой бороны при перемещении по поверхности почвы / В. Кравчук, Г. Хайлис, В. Шевчук // Техніка і технології АПК. – 2011. – № 10. – С. 23–25.
4. Синеоков Г. Н. Теория и расчет почвообрабатывающих машин / Г. Н. Синеоков, И. М. Панов. – М. : Машиностроение, 1977. – 328 с.
5. Выгодский М. Я. Справочник по высшей математике / М. Я. Выгодский. – [10-е изд., стер.]. – М. : Наука, 1972. – 872 с.
6. Добронравов В. В. Курс теоретической механики / В. В. Добронравов, Н. Н. Никитин. – М. : Высшая школа, 1983. – 575 с.
7. Бабицький Л. Ф. Біонічні напрями розробки ґрунтообробних машин / Л. Ф. Бабицький. – К. : Урожай, 1998. – 164 с.

УДК 631.348.4

Османов Э. Ш.

ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ ОБОСНОВАНИЕ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ВОЗДУШНО-ЖИДКОСТНОГО ПОТОКА НА ОПРЫСКИВАТЕЛЕ ДЛЯ БОРЬБЫ С СОРНОЙ РАСТИТЕЛЬНОСТЬЮ НА МНОГОЛЕТНИХ НАСАЖДЕНИЯХ

Аннотация. *В статье теоретически обосновано движение капли жидкости внутри рабочей камеры опрыскивателя под действием силы тяжести и силы давления осаждающего воздушного потока. Теоретически обоснована связь между такими параметрами работы в рабочей зоне опрыскивателя, как угол факела распыла распылителя, высота установки распылителя, скорости воздушного потока и капли рабочей жидкости. Выведенная в работе зависимость показывает, что капля после вылета из распылителя будет двигаться по параболе, геометрические параметры которой определяются скоростью вылета капли, углом факела распыла и скоростью осаждающего воздушного потока.*

Ключевые слова: *гербицид, опрыскиватель, воздушный поток, сорняк.*

Османов Е. Ш.

ТЕОРЕТИЧНЕ ОБҐРУНТУВАННЯ ВЗАЄМОДІЇ ПОВІТРЯНО-РІДИННОГО ПОТОКУ НА ОБПРИСКУВАЧІ ДЛЯ БОРОТЬБИ З БУР'ЯНАМИ НА БАГАТОРІЧНИХ НАСАДЖЕННЯХ

Анотація. *У статті теоретично обґрунтовано рух краплі рідини всередині робочої камери обприскувача під дією сили тяжіння й сили тиску осаджувального повітряного потоку. Теоретично обґрунтовано зв'язок між такими параметрами роботи в робочій зоні обприскувача, як кут факела розпилювання розпилювача, висота установки розпилювача, швидкості повітряного потоку та краплі робочої рідини. Виведена в роботі залежність показує, що крапля після вильоту з розпилювача рухатиметься по параболі, геометричні параметри якої визначаються швидкістю вильоту краплі, кутом факела розпилювання та швидкістю осаджувального повітряного потоку.*

Ключові слова: *гербіцид, обприскувач, повітряний потік, бур'ян.*

Osmanov E. Sh.

THEORETICAL BASIS OF INTERACTION OF AIR-LIQUID SPRAYER FLOW TO FIGHT WEEDS ON PERENNIAL PLANTINGS

Summary. *The article theoretically substantiated the movement of a liquid drop within the sprayer working chamber under the action of gravity and the pressure of the precipitant airflow. The link between such working parameters in the working area of the sprayer as the angle of the spray atomizer, installation height, the air flow rate of the working fluid and working liquid drops is theoretically substantiated. The dependence derived in the work shows that after departing from the spray the drop will be a parabola, the geometric parameters of which determine the rate of drops departure, spray angle and the speed of the precipitating air flow. The dependence of the rate of air flow, escape velocity of drops from the spray, spray half-angle and the height of the installation spray which help to simplify the selection of technological parameters of working bodies in the working area of the sprayer for weed control are described.*

Key words: *herbicide sprayer, air flow, weed.*

Постановка проблемы. В технологическом процессе возделывания винограда особое место занимают операции по защите виноградных насаждений от вредителей, болезней и сорной растительности.

При химической защите важную роль играет борьба с сорняками. При наличии на 1 м^2 100–200 сорняков с 1 га почвы выносится в среднем 100–140 кг калия. На образование 1 кг сухого вещества расходуется 250–1000 л воды, что свидетельствует об активном истощении плодородного почвенного слоя.

В связи с этим исследования, направленные на создание приспособлений к опрыскивателю для внесения гербицидов в садах и виноградниках с меньшим расходом ядохимикатов, обеспечивающих равномерную обработку межствольного и межкустового пространства, являются актуальными, имеют важное народнохозяйственное значение [1].

Цель работы – теоретически обосновать и связать между собой угол факела распылителя, высоту установки распылителя, скорости воздушного потока и капли рабочей жидкости.

Анализ литературы. Исследованию технологических процессов борьбы с сорной растительностью посвящены работы В. Ш. Ладонина, П. И. Войтова, Г. С. Груздева, С. С. Воложанинова, П. А. Догоды. Изучением турбулентных струй занимались такие ученые, как В. Ф. Дунский, Н. В. Никитин, Г. Н. Абрамович, П. А. Догода, С. С. Воложанинов.

Изложение основного материала. Одним из наиболее эффективных средств уничтожения сорной растительности является обработка поверхности сорных растений, произрастающих в междурядьях и приствольных полосах, гербицидами. Принцип внесения гербицидов прост. Капля химического препарата, попадая на растение, образует очаг поражения. Традиционные методы – чем больше капель, тем больше попаданий в цель – имеют существенный недостаток. Для того чтобы получить большее количество капель, необходимо увеличивать количество распыляемой жидкости на единицу площади. Это порождает ряд технических проблем и неудобств:

- увеличение частоты подвоза рабочего раствора (в семь раз и более);
- увеличение затрат, связанных с использованием дополнительной техники;
- увеличение объема технологических простоев;
- увеличение количества персонала, задействованного на химических работах.

Исследователи приходят к тому, что необходимо увеличивать количество капель путем уменьшения размера самой капли. При этом объем химического препарата, растворенного в объеме рабочей жидкости, остается постоянным [2]. В этом случае применение воздушно-жидкостного потока позволило бы усовершенствовать процесс внесения гербицидов. Сжатый воздух через щель в нижней части рукава должен податься в зону действия жидкостных распылителей. Количество и скорость воздуха позволит не только препятствовать снесению препарата, но и раздвигать густые насаждения растений, и таким образом распылитель обработает труднодоступную для обычных опрыскивателей внутреннюю сторону листьев.

Во многих странах ведутся исследования, показывающие, что при опрыскивании с использованием принудительного осаждения капель воздушным потоком на растениях оседает больше капель рабочего раствора, чем при обычном опрыскивании.

Рассеивание жидких струй основано на законах турбулентного перемешивания газожидкостной среды. Характер распределения потока капель в воздушной струе изучен недостаточно, это объясняется сложностью физических процессов, сопровождающих перемешивание распыленной жидкости с окружающей средой, и трудностью построения расчетной модели.

В большинстве случаев распылитель устанавливают так, чтобы струя была направлена вертикально вниз. Исследование механизма взаимодействия направленного вертикально вниз воздушного потока с воздушно-капельным потоком, образующимся при работе распылителя, позволит определить взаимосвязь скорости осаждающего воздушного потока, скорости вылета капли из сопла распылителя, высоту установки распылителя и угол факела распыла распылителя.

При исследовании данного процесса примем, что факел распыла симметричен относительно продольной оси распылителя и рабочая жидкость распределена равномерно внутри факела распыла. В таком случае необходимо исследовать полет только крайних капель. Изучением движения капли жидкости применительно к ленточному внесению пестицида занимался О. В. Гордеенко [3]. Однако в случае использования предлагаемого нами опрыскивателя (рис. 1) на каплю жидкости, кроме силы тяжести, действует еще и сила давления воздушного потока.

Рис. 1. Лабораторно-полевая экспериментальная установка опрыскивателя навесного гербицидного виноградникового.

Применительно к процессам, происходящим в рабочей зоне опрыскивателя, задача о движении капли жидкости в вертикальном нисходящем воздушном потоке будет иметь следующий вид. Пусть имеется вертикальный воздушный поток, движущийся со скоростью $V_в$, и распылитель, установленный на высоте H над центром транспортера. Из распылителя вылетает капля жидкости со скоростью V под углом φ к вертикали. Необходимо определить, каковы должны быть скорость воздушного потока $V_в$, скорость вылета капли из распылителя V, половина угла факела распыла φ и высота установки распылителя H, чтобы капля достигла объекта обработки не далее края защитного щита штанги, то есть в точке A. Ширина защитного щитка равна $2B$ (рис. 2).

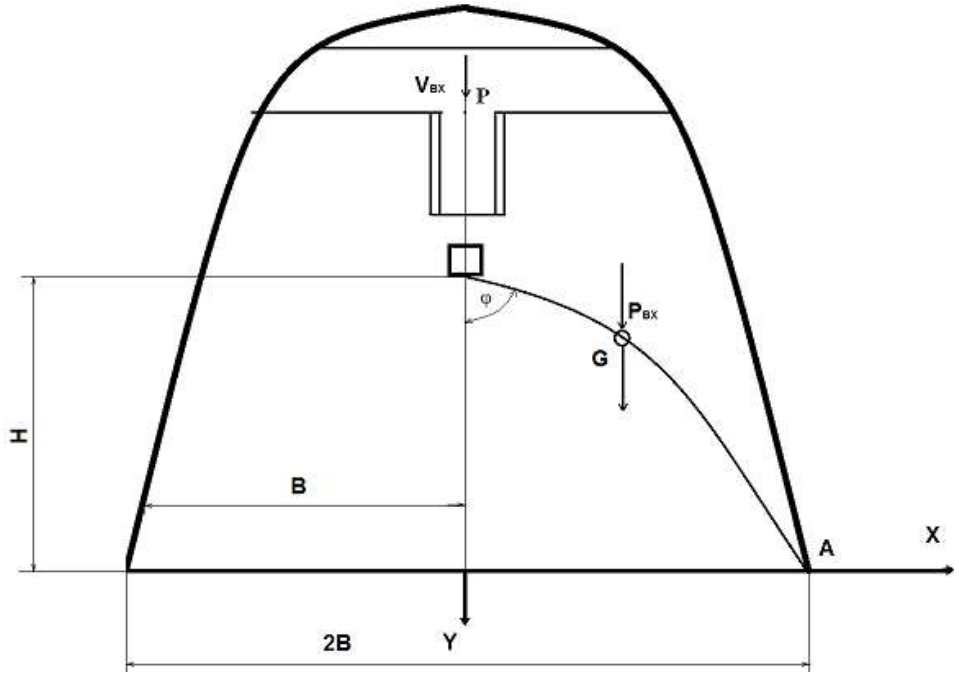


Рис. 2. Схема к определению параметров работы опрыскивателя в рабочей зоне.

Из литературы известно, что ускорение, сообщаемое капле воздушным потоком, определяется следующим образом [3]:

$$a = \frac{c \cdot \rho_в \cdot S_к \cdot V_в^2}{m}, \qquad (1)$$

где c – коэффициент сопротивления воздуха;
$S_к$ – миделево сечение капли, м^2;
m – масса капли, кг;
$\rho_в$ – плотность воздуха, кг/м^3;
$V_в$ – скорость воздушного потока, м/с.

Коэффициент сопротивления воздуха зависит от числа Рейнольдса и определяется формулой [4]:

$$c = \frac{24}{\mathrm{Re}} + \frac{2{,}5}{\sqrt[4]{\mathrm{Re}}}, \qquad (2)$$

где $\mathrm{Re} = \frac{V_в \cdot d_к}{v}$ – число Рейнольдса;

$d_к$ – диаметр капли, м;
v – кинематическая вязкость воздуха (v = 1,45×10^{-5} м^2/с при нормальных условиях).

Для упрощения использования в дальнейшем формулу (1) приведем к виду:

$$a = k_п \cdot V^2, \qquad (3)$$

где $k_п$ – коэффициент парусности.

При таких условиях капля рабочей жидкости в рабочей зоне опрыскивателя осаждается под действием силы тяжести и силы давления воздушного потока:

$$F = m \cdot g + m \cdot a, \qquad (4)$$

где g – ускорение свободного падения, м/с^2.

Далее неподвижную систему координат *XOY* совмещаем с распылителем, ось *OY* при этом направим вертикально вниз. Также для исследования движения капли в заданных неподвижных осях возникает необходимость использования подвижной системы координат τ*Mn*, при этом ось *M*τ будет направлена по касательной к траектории движения в сторону возрастания дуговой координаты *OM*, а ось *Mn* – по радиусу кривизны траектории.

Дифференциальные уравнения движения капли в проекциях на естественные оси будут иметь следующий вид. Для оси *M*τ дифференциальное уравнение примет вид:

$$m \cdot \frac{dV'}{dt} = (m \cdot g + m \cdot a) \cdot \cos\varphi, \qquad (5)$$

где $V' = V + a \cdot t \cdot \cos\varphi$ – скорость, которую приобретает капля из-за суммарного воздействия на нее воздушного потока силы тяжести.

Для оси *Mn* дифференциальное уравнение запишем в следующем виде:

$$m \cdot \frac{V'^2}{\rho} = (m \cdot g + m \cdot a) \cdot \sin\varphi. \qquad (6)$$

После деления левых и правых частей уравнений (5) и (6) на массу капли m они примут вид:

$$\frac{dV'}{dt} = (g + a) \cdot \cos\varphi, \qquad (7)$$

$$\frac{V'^2}{\rho} = (g + a) \cdot \sin\varphi. \qquad (8)$$

Кривизну траектории точки можно выразить через дуговую координату:

$$\frac{1}{\rho} = -\frac{d\varphi}{ds} = -\frac{1}{V'} \cdot \frac{d\varphi}{dt}, \qquad (9)$$

где ds – изменение дуговой координаты на траектории движения точки за время dt;
$d\varphi$ – угол, на который изменится положение точки за время dt, при движении ее по дуге ds.

Подставим выражение (9) в уравнение (7) и, после преобразований, придем к уравнению:

$$V^{/} \cdot \frac{d\varphi}{dt} = -(g+a) \cdot \sin\varphi . \qquad (10)$$

Решая уравнение (10) относительно *dt*, получим:

$$dt = -\frac{V^{/} \cdot d\varphi}{(g+a) \cdot \sin\varphi} . \qquad (11)$$

Зная время движения капли, можно получить выражение для определения скорости.

Подставим уравнение (11) в уравнение (7) и упростим:

$$dV^{/} = (g+a) \cdot \cos\varphi \cdot (-\frac{V^{/} \cdot d\varphi}{(g+a) \cdot \sin\varphi}) . \qquad (12)$$

Уравнение (12) после разделения переменных приводится к виду:

$$\frac{dV^{/}}{V^{/}} = -\mathrm{ctg}\varphi \cdot d\varphi . \qquad (13)$$

Выражение (13) можно интегрировать с учетом начальных условий (t = 0; $V^{/} = V$; $\varphi = \varphi_0$) и получить следующее уравнение:

$$\ln\left|V^{/}\right| - \ln\left|V_0\right| = -\ln\left|\sin\varphi\right| + \ln\left|\sin\varphi_0\right| . \qquad (14)$$

Используя свойства логарифмов и решив выражение (14) относительно скорости движения капли, можно получить:

$$V^{/} = V_0 \cdot \frac{\sin\varphi_0}{\sin\varphi} . \qquad (15)$$

Уравнение (15) является законом изменения скорости капли, двигающейся под действием силы тяжести и силы давления осаждающего воздушного потока.

Определим траекторию движения капли, для чего исследуем ее движение относительно неподвижной системы координат *XOY*:

$$\frac{dx}{dt} = V_x = V^{/} \cdot \sin\varphi = V_0 \cdot \sin\varphi_0 . \qquad (16)$$

Проинтегрировав выражения (16) с учетом начальных условий (t = 0; x_0 = 0), можно получить закон движения капли вдоль оси *OX*:

$$x = V_0 \cdot \sin\varphi_0 \cdot t . \qquad (17)$$

Если рассматривать уравнение движения капли вдоль оси *OY*, то получим следующее:

$$\frac{dV_y}{dt} = g + a . \qquad (18)$$

Проинтегрировав выражение (18) с учетом начальных условий, получим:

$$V_y = \frac{dy}{dt} = (g+a) \cdot t + V_0 \cdot \cos\varphi_0 , \qquad (19)$$

Разделив переменные и проинтегрировав выражение (19), можно получить закон движения капли вдоль оси *OY* под действием осаждающего воздушного потока и силы тяжести:

$$y = \frac{(g+a) \cdot t^2}{2} + V_0 \cdot t \cdot \cos\varphi_0 . \qquad (20)$$

С учетом преобразований выражение (20) представляет собой обыкновенное квадратичное уравнение. После решения его относительно времени падения капли с заданной высоты получим:

$$t = \frac{-V_0 \cdot \cos\varphi_0 + \sqrt{V_0^2 \cdot \cos^2 \cdot \varphi_0 + 2 \cdot (g+a) \cdot y}}{g+a} . \qquad (21)$$

Уравнения (17), (20) и (21) определяют положение капли на траектории в любой момент времени. Исключив из (17) и (20) время *t*, получим уравнение траектории капли:

$$y = \frac{g+a}{2 \cdot V_0^2 \cdot \sin^2\varphi_0} \cdot x^2 + x \cdot \mathrm{ctg}\varphi_0 , \qquad (22)$$

После упрощений и преобразований выражения (22) оно примет вид:

$$y = \frac{(g+a) \cdot x^2}{2 \cdot V_0^2} \cdot \left(1 + \mathrm{ctg}^2\varphi_0\right) + x \cdot \mathrm{ctg}\varphi_0 . \qquad (23)$$

Анализ уравнения (22) показывает, что капля после вылета из распылителя будет двигаться по параболе, геометрические параметры которой определяются скоростью вылета капли, углом факела распыла и скоростью осаждающего воздушного потока.

Для определения значения угла φ_0, при котором капля жидкости не пересечет точку на краю защитного кожуха с координатами $x = B$ и $y = H$, необходимо подставить значение данных координат в выражение (23), в результате чего получим:

$$y = \frac{g+a}{2 \cdot V_0^2} \cdot B^2 + \frac{(g+a) \cdot B^2}{2 \cdot V_0^2} \cdot \mathrm{ctg}^2\varphi_0 + B \cdot \mathrm{ctg}\varphi_0 . \qquad (24)$$

Выражение (24) является квадратичным уравнением. После решения его относительно параметра $\mathrm{ctg}\varphi_0$ оно примет вид:

$$\mathrm{ctg}\varphi_0 = \frac{-V_0^2 + \sqrt{V_0^4 - (g+a) \cdot \left((g+a) \cdot B^2 - 2 \cdot H \cdot V_0^2\right)}}{(g+a) \cdot B} , \qquad (25)$$

где B – половина ширины защитного кожуха, м;
H – высота установки распылителя над уровнем почвы, м.

Выражение (25) будет иметь смысл только в том случае, если выражение под корнем будет больше нуля, т. е.:

$$2 \cdot H \cdot V_0^2 > (g+a) \cdot B^2 . \qquad (26)$$

С учетом того, что высота установки распылителя и ширина рабочего кожуха являются технологическими параметрами, из выражения (26) нетрудно установить минимальную скорость вылета капли из сопла распылителя:

$$V_{0\min} \geq \sqrt{\frac{g+a}{2 \cdot H}} \cdot B . \qquad (27)$$

Рассмотрев $\mathrm{ctg}\varphi_0$ в уравнении (24) как обобщенный параметр семейства кривых, найдем уравнение, огибающее это семейство. Перепишем уравнение (24) в следующей форме:

$$-y + x \cdot z + \frac{(g+a)}{2 \cdot V_0^2} \cdot \left(1 + z^2\right) \cdot x^2 = 0, \qquad (28)$$

где $z = \mathrm{ctg}\varphi_0$.

Из уравнения (28) найдем максимальное значение угла выброса капли из сопла распылителя при заданных параметрах ($y = H = \mathrm{const}$; $V_0 = V_{0\max}$; $z = \mathrm{ctg}\varphi_0$).

Продифференцировав уравнение (28) по параметру z и приравняв нулю отношение dx/dz, получим, что z имеет максимум, что видно из отрицательного значения второй производной:

$$\frac{dx}{dz} = \frac{x \cdot \left(V_0^2 + (g+a) \cdot x \cdot z\right)}{(g+a) \cdot (1+z^2) + z \cdot V_0^2} = 0. \qquad (29)$$

Выражение (29) равно нулю, если числитель равен нулю. Это возможно в случае, если $x = 0$, что соответствует падению капли по вертикали. Приравняв нулю выражение, заключенное в скобки в числителе в (29), и решив его относительно «z», получим:

$$z_{\max} = \mathrm{ctg}\varphi_{0\max} = \frac{-V_0}{(g+a) \cdot x}. \qquad (30)$$

После подстановки выражения (30) в уравнение (24) получим уравнение параболы, по которой движется крайняя капля:

$$y = \frac{1}{2} \cdot \left(\frac{(g+a) \cdot x^2}{V_0^2} - \frac{V_0^2}{g+a} \right). \qquad (31)$$

Из уравнения (31) находим максимальную скорость вылета капли жидкости из сопла, при которой она не перелетит через край защитного кожуха:

$$V_0^{\max} \le \sqrt{(g+a) \cdot \left(H + \sqrt{H^2 + B^2} \right)}. \qquad (32)$$

Из уравнений (27) и (32) можно получить допустимые пределы изменения скорости вылета капли из сопла распылителя, при которой они не покинут зону обработки:

$$\sqrt{\frac{g+a}{2 \cdot H}} \cdot B \le V_0 \le \sqrt{(g+a) \cdot \left(H + \sqrt{H^2 + B^2} \right)}. \qquad (33)$$

Неравенство (32) определяет зависимость между скоростью вылета капли из распылителя, шириной защитного кожуха, высотой установки распылителя и ускорением, придаваемым капле воздушным потоком, а уравнение (25) позволяет определить половину угла факела распыла распылителя.

Выводы. Описанные зависимости скорости воздушного потока $V_в$, скорости вылета капли из распылителя V, половина угла факела распыла φ и высота установки распылителя H позволят упростить подбор технологических параметров рабочих органов в рабочей зоне опрыскивателя для борьбы с сорной растительностью.

ЛИТЕРАТУРА

1. Обоснование параметров воздушно-жидкостного потока при обработке сорных растений в междурядьях виноградников / [П. А. Догода, А. В. Степанов, И. В. Соболевский, Э. Ш. Османов] // Магарач. Виноградарство и виноделие : научно-производственный журнал. – 2010. – № 3. – С. 12–14.
2. Гассен Д. Наука пестицидного внесения [Электронный ресурс] / Д. Гассен, Ф. Гессен // Зерно : Всеукраинский журнал современного агропромышленника. – 2007. – № 10, октябрь. – Режим доступа : http://www.zerno-ua.com.
3. Гордеенко О. В. Обоснование параметров распылителя при совмещении операции по уходу за посевами овощных культур на гребнях / О. В. Гордеенко // Моделирование сельскохозяйственных процессов и машин : материалы международной научн.-практ. конф. / Белорусский государственный аграрный технический университет. – Минск, 2002. – Ч. 1. – С. 36–38.
4. Лышевский А. С. Изменение коэффициента сопротивления жидких капель / А. С. Лышевский // Известия высших учебных заведений. – 1964. – № 5. – С. 28–31.

Раздел 4. ПРОБЛЕМЫ ОХРАНЫ ТРУДА И ЗАЩИТЫ ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЫ

УДК 621.311.1(045)

Кучеренко С. В., Асанов М. М., Бекиров Э. А.

ОЦЕНКА ВЛИЯНИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ПОЛЕЙ ВЫСОКОВОЛЬТНЫХ ЛИНИЙ ЭЛЕКТРОПЕРЕДАЧИ НА ОКРУЖАЮЩУЮ СРЕДУ

Аннотация. *Работа посвящена расчету электрических полей высоковольтных линий электропередач напряжением 35 кВ, 110 кВ, 220 кВ, а также определению санитарно-защитной зоны высоковольтных линий. Расчет напряженности электрического поля высоковольтной линии производился методом зеркальных отображений. На основании расчета проведен анализ влияния электрических полей высоковольтных линий электропередач на окружающую среду, построены графики зависимости напряженности электрического поля от высоты воздушных линий над уровнем земли и от расстояния крайних фазных проводов до точки на поверхности земли.*

Ключевые слова: *экологическое влияние, линия электропередач, метод зеркальных отображений.*

Кучеренко С. В., Асанов М. М., Бекіров Е. А.

ОЦІНКА ВПЛИВУ ЕЛЕКТРИЧНИХ ПОЛІВ ВИСОКОВОЛЬТНИХ ЛІНІЙ ЕЛЕКТРОПЕРЕДАЧІ НА ДОВКІЛЛЯ

Анотація. *Робота присвячена розрахунку електричних полів високовольтних ліній електропередач напругою 35 кВ, 110 кВ, 220 кВ, а також визначенню санітарно-захисної зони високовольтних ліній. Розрахунок напруженості електричного поля високовольтної лінії проводився методом дзеркальних відображень. На підставі розрахунку проведено аналіз впливу електричних полів високовольтних ліній електропередач на довкілля, побудовано графіки залежності напруженості електричного поля від висоти повітряних ліній над рівнем землі та від відстані крайніх фазних проводів до точки на поверхні землі.*

Ключові слова: *екологічний вплив, лінія електропередач, метод дзеркальних відображень.*

Kucherenko S. V., Asanov M. M., Bekirov E. A.

ASSESSMENT OF HIGH-VOLTAGE ELECTRIC FIELDS TRANSMISSION LINE INFLUENCE ON THE ENVIRONMENT

Summary. *This work is devoted to the calculation of the electric fields of high voltage power lines of 35 kV, 110 kV and 220 kV, as well as the determination of the sanitary protection zone of high-voltage power lines. One of the parameters for assessing the environmental impact of high voltage power lines is the intensity level of the electric field formed in the space near the line. Recent studies have shown that a large electric field level even with short-term exposure can cause adverse effects on living organisms. In order to protect the people from the effects of the electric field of high-voltage power lines, sanitary protection zones are established. Calculation of the electric field intensity of high voltage power line is made by the mirror images method.*

Analysis of the influence of electric fields of high voltage power lines on the environment is made, diagrams of the electric field intensity dependence on the height of the power lines above ground level and the distance from the extreme phase conductors to the point on the earth's surface are built on the basis of the calculations.

Key words: *environmental impact, power line, the mirror image method.*

Постановка проблемы. Одним из параметров оценки экологического влияния высоковольтных линий электропередачи (ВЛЭП) является уровень напряженности электрического поля, создаваемого в пространстве, окружающем линию.

Анализ научной литературы показал, что большой уровень электрического поля может вызвать негативные последствия на живые организмы даже при кратковременном воздействии. При длительном систематическом пребывании человека в электрическом поле могут возникать изменения функционального состояния нервной, сердечнососудистой, иммунной систем, так же имеется вероятность увеличения риска развития злокачественных новообразований центральной нервной системы [1–4].

Согласно санитарным нормам установлены следующие предельно допустимые уровни напряженности электрического поля [4]:

- внутри жилых зданий – 0,5 кВ/м;
- на территории зоны жилой застройки – 1 кВ/м;
- в населенной местности, вне зоны жилой застройки (земли городов в пределах городской черты в границах их перспективного развития на 10 лет, пригородные и зеленые зоны, курорты, земли поселков городского типа, в пределах поселковой черты и сельских населенных пунктов, в пределах черты этих пунктов), а также на территории огородов и садов – 5 кВ/м;
- на участках пересечения воздушных линий электропередачи с автомобильными дорогами I–V категории – 10 кВ/м;
- в ненаселенной местности (незастроенные местности, хотя бы и часто посещаемые людьми, доступные для транспорта и сельскохозяйственные угодья) – 15 кВ/м;
- в труднодоступной местности (не доступной для транспорта и сельскохозяйственных машин) и на участках, специально отгороженных для исключения доступа населения – 20 кВ/м.

В целях защиты населения от воздействия электрического поля высоковольтных линий (ВЛ) устанавливаются санитарно-защитные зоны. Санитарно-защитной зоной ВЛ является территория вдоль трассы ВЛ, в которой напряженность электрического поля превышает 1 кВ/м [1–4].

Целью настоящей **работы** является расчет напряженности электрических полей, создаваемых высоковольтными линиями электропередач напряжением 35 кВ, 110 кВ и 220 кВ, а также определение санитарно-защитной зоны высоковольтных линий.

Изложение основного материала. Трехпроводная линия электропередачи с фазным напряжением U_Φ находится на высоте h над поверхностью земли. Расстояние между ближайшими проводами равно d, радиусы проводов равны r_0.

Определение линейных плотностей зарядов на проводах линии. Ввиду квазистационарности электрического поля на частоте 50 Гц для расчета линейных плотностей заряда проводов можно использовать теорию электростатического поля [5–7].

Для этого необходимо найти мгновенные значения напряжений на проводах в заданный момент времени.

Фазные напряжения на трех фазах определяются уравнениями:

$$\begin{aligned} u_A &= U_\Phi\sqrt{2}\sin(2\pi ft); \\ u_B &= U_\Phi\sqrt{2}\sin(2\pi ft-120°); \\ u_C &= U_\Phi\sqrt{2}\sin(2\pi ft+120°). \end{aligned} \qquad (1)$$

В момент времени $t = 0$:

$$u_A = 0 = \varphi_A;$$

$$u_B = U_\Phi\sqrt{2}\sin(-120°) = -U_\Phi\sqrt{2}\sqrt{3}/2 = \varphi_B;$$

$$u_C = U_\Phi\sqrt{2}\sin(120°) = U_\Phi\sqrt{2}\sqrt{3}/2 = \varphi_C,$$

где φ_A, φ_B, φ_C – потенциалы на поверхности проводов фазы A, B и C, соответственно.

Для дальнейших расчетов следует воспользоваться методом зеркальных отображений и построить расчетную схему [5–7]. На рис. 1 представлена полученная схема трехпроводной линии.

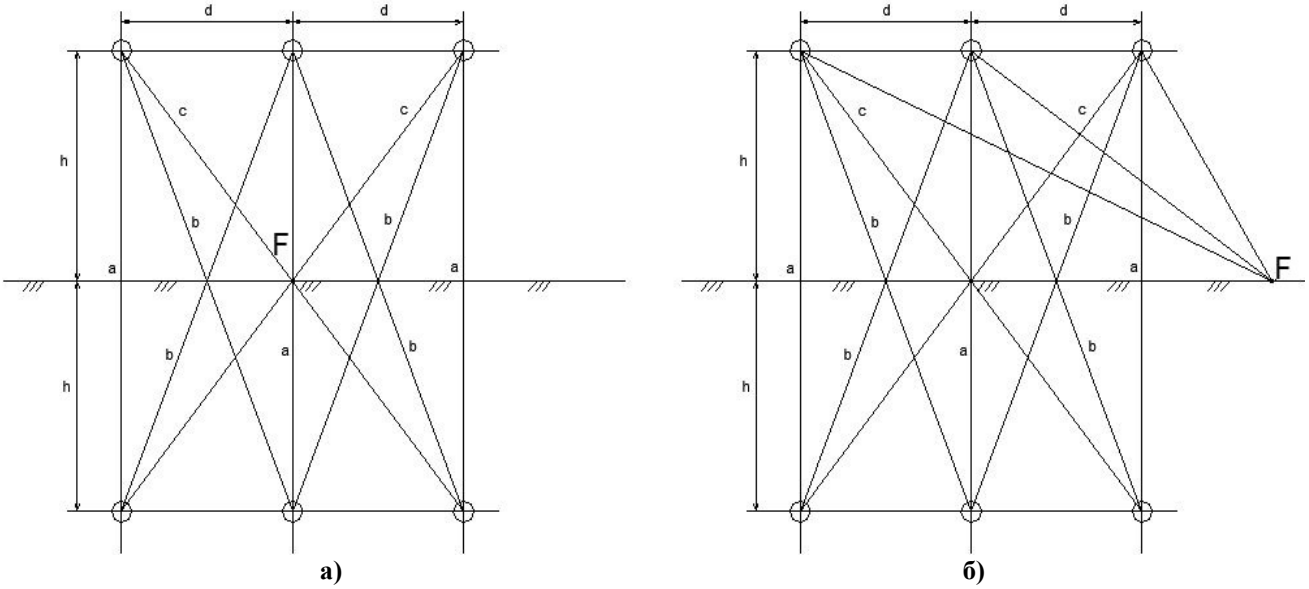


Рис. 1. Трехпроводная линия электропередачи:
а) точка у основания линии электропередачи; б) точка вне линии электропередачи.

Исходя из геометрических параметров линии можно определить потенциалы на поверхности каждого провода. Например, потенциал на поверхности первого провода φ_A будет складываться из потенциала φ_{AA}, создаваемого им самим и его зеркальным отображением, а также потенциалов φ_{AB} и φ_{AC}, создаваемых остальными проводами и их зеркальными отображениями:

$$\varphi_A = \varphi_{AA} + \varphi_{AB} + \varphi_{AC}. \quad (2)$$

Потенциал φ_{AA}, создаваемый самим проводом и его зеркальным отображением, можно найти по формуле:

$$\varphi_{AA} = \frac{\tau_A}{2\pi\varepsilon_0}\ln\left(\frac{a}{r_0}\right), \quad (3)$$

где τ_A – линейная плотность заряда на проводе *A*, Кл/м;

r_0 – радиус провода, м;

$a = 2h$ – расстояние от провода до его зеркального отображения, м.

Потенциалы полей соседних проводов и их зеркальных отображений можно определить по формулам:

$$\varphi_{AB} = \frac{\tau_B}{2\pi\varepsilon_0}\ln\left(\frac{b}{d}\right); \quad (4)$$

$$\varphi_{AC} = \frac{\tau_C}{2\pi\varepsilon_0}\ln\left(\frac{c}{2d}\right), \quad (5)$$

где *b, c* – соответствующие расстояния в расчетной схеме.

Под знаком логарифма в знаменателе стоит расстояние от провода *A* до какого-либо из соседних проводов, а в числителе – от провода *A* до зеркального отображения соответствующего провода.

Если значения потенциалов, найденных по формулам (3), (4), (5), разделить на соответствующую плотность заряда, то можно получить потенциальные коэффициенты:

$$\alpha_{AA} = \frac{1}{2\pi\varepsilon_0}\ln\left(\frac{a}{r_0}\right);$$

$$\alpha_{AB} = \frac{1}{2\pi\varepsilon_0}\ln\left(\frac{b}{d}\right); \quad (6)$$

$$\alpha_{AC} = \frac{1}{2\pi\varepsilon_0}\ln\left(\frac{c}{2d}\right).$$

Из рис. 1 следует:

$$\alpha_{AA} = \alpha_{BB} = \alpha_{CC};$$

$$\alpha_{BA} = \alpha_{AB} = \alpha_{BC} = \alpha_{CB};$$

$$\alpha_{CA} = \alpha_{AC}.$$

Для определения зарядов проводов составим первую группу формул Максвелла:

$$\begin{cases} \varphi_A = \tau_A\alpha_{AA} + \tau_B\alpha_{AB} + \tau_C\alpha_{AC}; \\ \varphi_B = \tau_A\alpha_{BA} + \tau_B\alpha_{BB} + \tau_C\alpha_{BC}; \\ \varphi_C = \tau_A\alpha_{CA} + \tau_B\alpha_{CB} + \tau_C\alpha_{CC}. \end{cases} \quad (7)$$

Решив систему уравнений (7), получим линейные плотности зарядов для трех проводов.

Определение напряженности электрического поля у основания линии электропередачи. Напряженность электрического поля у основания линии в точке *F* (рис. 1) будет складываться из напряженностей полей всех проводов и их зеркальных отображений.

Используя полученные величины плотностей зарядов, можем записать:

$$\overrightarrow{E_F} = \overrightarrow{E_{FA}} + \overrightarrow{E_{FB}} + \overrightarrow{E_{FC}} + \overrightarrow{E^*_{FA}} + \overrightarrow{E^*_{FB}} + \overrightarrow{E^*_{FC}}. \quad (8)$$

Модули векторов напряженностей для каждого провода можно определить по выражениям:

$$E_{FA} = E^*_{FA} = \frac{\tau_A}{2\pi\varepsilon_0}\frac{1}{0{,}5c};$$

$$E_{FB} = E^*_{FB} = \frac{\tau_B}{2\pi\varepsilon_0}\frac{1}{h}; \quad (9)$$

$$E_{FC} = E^*_{FC} = \frac{\tau_C}{2\pi\varepsilon_0}\frac{1}{0{,}5c}.$$

Из рис. 1 видно, что горизонтальные проекции всех векторов напряженности будут компенсироваться.

Если принять во внимание равенство модулей соответствующих напряженностей, модуль вектора E_F можно найти по формуле:

$$E_F = 2\frac{\tau_A}{2\pi\varepsilon_0}\frac{1}{0{,}5c}\sin\gamma + 2\frac{\tau_B}{2\pi\varepsilon_0}\frac{1}{h} + 2\frac{\tau_C}{2\pi\varepsilon_0}\frac{1}{0{,}5c}\sin\gamma, \quad (10)$$

где γ – угол между прямой *c* и плоскостью земли; *h, c* – соответствующие расстояния в расчетной схеме (рис. 1).

Расчет электрического поля трехпроводной линии 35 кВ.

Исходные данные:

Фазное напряжение $U_Ф$, кВ	35
Высота подвеса *h*, м	13
Расстояние между проводами *d*,	3
Радиус провода r_0, см	1,5
Длина пролета, м	150
Стрела провеса, м	1,5

Определим фазные напряжения в момент времени $t = 0$:

$$u_A = 0 = \varphi_A;$$
$$u_B = -42{,}9 \text{ кВ} = \varphi_B;$$
$$u_C = 42{,}9 \text{ кВ} = \varphi_C.$$

Пользуясь (6), получим потенциальные коэффициенты:

$$\alpha_{AA} = 13{,}2\cdot10^{10};$$
$$\alpha_{AB} = 3{,}7\cdot10^{10};$$
$$\alpha_{AC} = 2{,}5\cdot10^{10}.$$

Решив первую группу формул Максвелла (7), получим:

$$\tau_A = 0{,}45\cdot10^{-7} \text{ Кл/м};$$
$$\tau_B = -4{,}63\cdot10^{-7} \text{ Кл/м};$$
$$\tau_C = 4{,}46\cdot10^{-7} \text{ Кл/м}.$$

Определение напряженности электрического поля у основания линии электропередачи.

Модули векторов напряженностей для каждого провода можно определить по выражениям (9):

$$E_{FA} = E^*_{FA} = 68 \text{ В/м};$$

$$E_{FB} = E^*_{FB} = 724 \text{ В/м};$$

$$E_{FC} = E^*_{FC} = 674 \text{ В/м}.$$

Модуль вектора E_F можно найти по формуле (10):

$$\sin\gamma = 0{,}966;\ E_F = 2881{,}38 \text{ В/м}.$$

Расчет электрического поля трехпроводной линии 110 кВ.

Исходные данные:

Фазное напряжение $U_Ф$, кВ	110
Высота подвеса h, м	14
Расстояние между проводами d, м	4
Радиус провода r_0, см	2
Длина пролета, м	150
Стрела провеса, м	1,5

Определим фазные напряжения в момент времени $t = 0$:

$$u_A = 0 = \varphi_A;$$
$$u_B = -134{,}72 \text{ кВ} = \varphi_B;$$
$$u_C = 134{,}72 \text{ кВ} = \varphi_C.$$

Пользуясь (6), получим потенциальные коэффициенты:

$$\alpha_{AA} = 12{,}8\cdot10^{10};$$
$$\alpha_{AB} = 3{,}3\cdot10^{10};$$
$$\alpha_{AC} = 2{,}1\cdot10^{10}.$$

Решив первую группу формул Максвелла (7), получим:

$$\tau_A = 1{,}44\cdot10^{-7} \text{ Кл/м};$$
$$\tau_B = -14{,}51\cdot10^{-7} \text{ Кл/м};$$
$$\tau_C = 14{,}03\cdot10^{-7} \text{ Кл/м}.$$

Определение напряженности электрического поля у основания линии электропередачи.

Модули векторов напряженностей для каждого провода можно определить по выражениям (9):

$$E_{FA} = E^*_{FA} = 197 \text{ В/м};$$

$$E_{FB} = E^*_{FB} = 2089 \text{ В/м};$$

$$E_{FC} = E^*_{FC} = 1919 \text{ В/м}.$$

Модуль вектора E_F можно найти по формуле (10):

$$\sin\gamma = 0{,}95;\ E_F = 8198 \text{ В/м}.$$

Расчет электрического поля трехпроводной линии 220 кВ.

Исходные данные:

Фазное напряжение $U_Ф$, кВ	220
Высота подвеса h, м	25
Расстояние между проводами d, м	8
Радиус провода r_0, см	2,7
Длина пролета, м	400
Стрела провеса, м	4

Определим фазные напряжения в момент времени $t = 0$:

$$u_A = 0 = \varphi_A;$$
$$u_B = -269{,}44 \text{ кВ} = \varphi_B;$$
$$u_C = 269{,}44 \text{ кВ} = \varphi_C.$$

Пользуясь (6), получим потенциальные коэффициенты:

$$\alpha_{AA} = 13{,}2\cdot10^{10};$$
$$\alpha_{AB} = 3\cdot10^{10};$$
$$\alpha_{AC} = 1{,}9\cdot10^{10}.$$

Решив первую группу формул Максвелла (7), получим:

$$\tau_A = 2{,}34\cdot10^{-7} \text{ Кл/м};$$
$$\tau_B = -26{,}9\cdot10^{-7} \text{ Кл/м};$$
$$\tau_C = 26{,}19\cdot10^{-7} \text{ Кл/м}.$$

Определение напряженности электрического поля у основания линии электропередач.

Модули векторов напряженностей для каждого провода можно определить по выражениям (9):

$$E_{FA} = E^*_{FA} = 187 \text{ В/м};$$

$$E_{FB} = E^*_{FB} = 2304 \text{ В/м};$$

$$E_{FC} = E^*_{FC} = 2097 \text{ В/м}.$$

Модуль вектора E_F можно найти по формуле (10):

$$\sin\gamma = 0{,}935;\ E_F = 8879 \text{ В/м}.$$

На рис. 2–4 отражены зависимости напряженности ВЛЭП (35–220 кВ) от высоты над поверхностью земли, а на рис. 5–7 – зависимости напряженности ВЛЭП (35–220 кВ) от расстояния крайнего фазного провода до расположения индивидуальных строительных жилищ и домов.

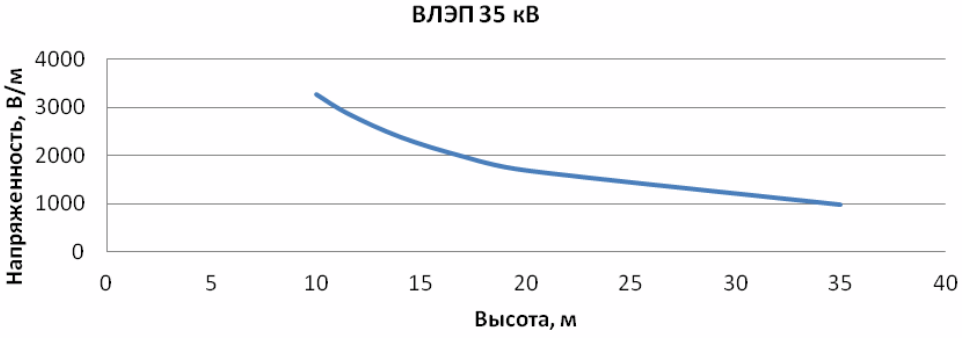


Рис. 2. Зависимость напряженности от высоты ВЛЭП 35 кВ.

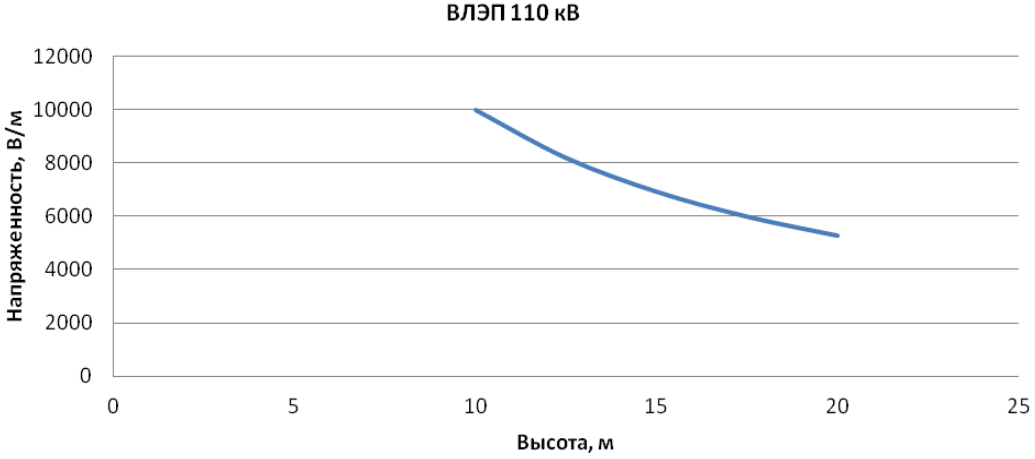


Рис. 3. Зависимость напряженности от высоты ВЛЭП 110 кВ.

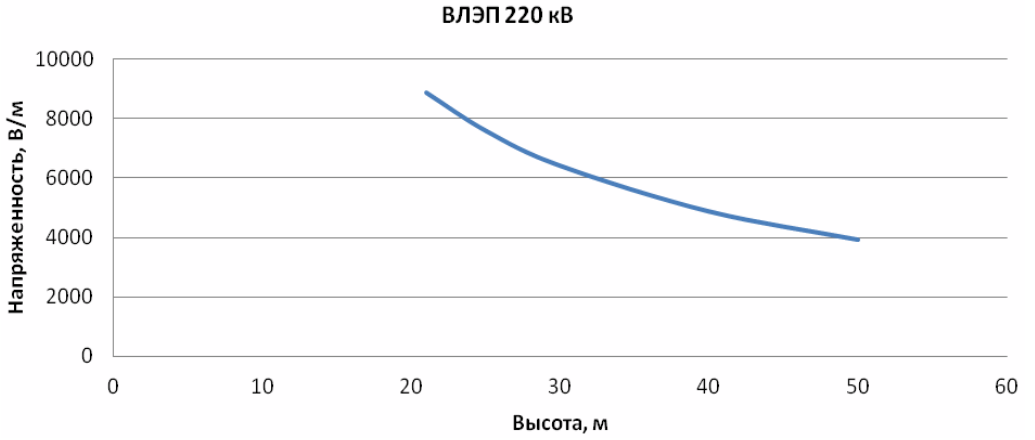


Рис. 4. Зависимость напряженности от высоты ВЛЭП 220 кВ.

Рис. 5. Зависимость напряженности электрического поля ВЛЭП 35 кВ от расстояния.

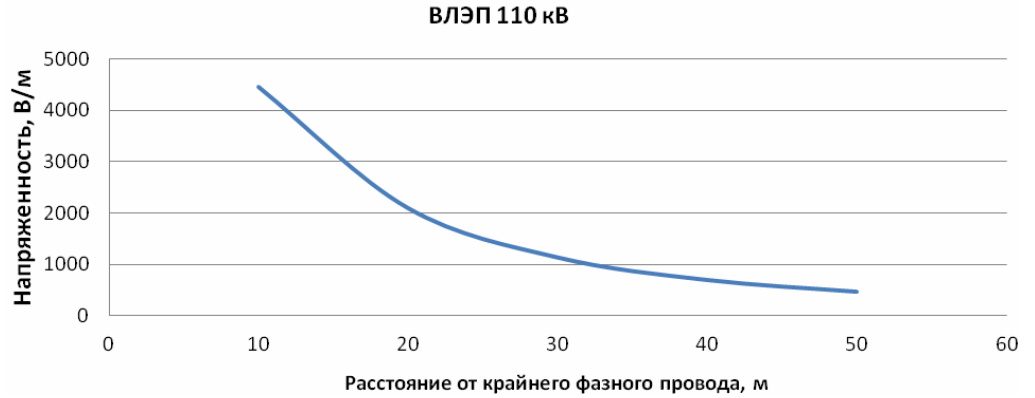


Рис. 6. Зависимость напряженности электрического поля ВЛЭП 110 кВ от расстояния.

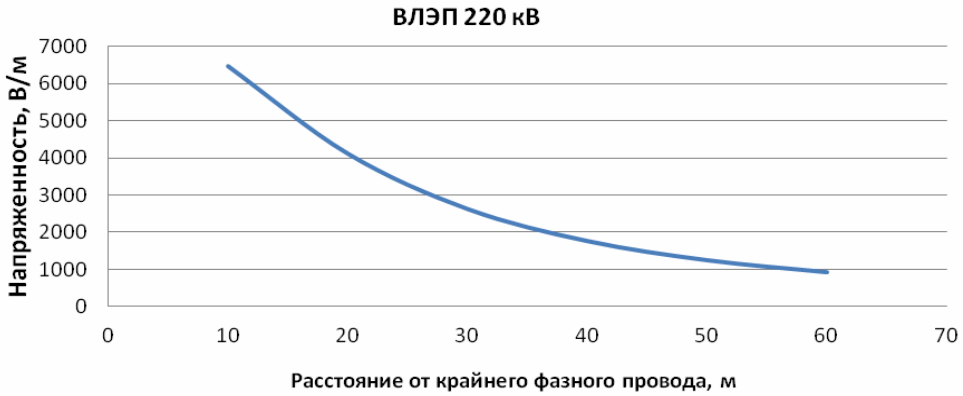


Рис. 7. Зависимость напряженности электрического поля ВЛЭП 220 кВ от расстояния.

Выводы. На основе проведенных расчетов напряженности электрического поля воздушных линий напряжением 35 кВ, 110 кВ, 220 кВ методом зеркальных отображений были построены графики зависимости напряженности электрического поля от высоты воздушных линий над уровнем земли и от расстояния крайних фазных проводов до точки на поверхности земли. Полученные результаты будут полезны при оценке возможности расположения индивидуальных строительных жилищ и домов в соответствии с нормами безопасности.

ЛИТЕРАТУРА

1. Чехов В. И. Экологически аспекты передачи электроэнергии / В. И. Чехов. – М. : МЭИ, 1991. – 44 с.
2. Сподобаев Ю. М. Основы электромагнитной экологии / Ю. М. Сподобаев, В. П. Кубанов. – М. : Радио и связь, 2000. – 240 с.
3. Федорович Г. В. Экологический мониторинг электромагнитных полей / Г. В. Федорович. – М., 2004. – 140 с.
4. ДБН В.2.5-27-2006 Захисні заходи електробезпеки в електроустановках будинків і споруд.
5. Теоретические основы электротехники : в 3 т. / [К. С. Демирчян, Л. Р. Нейман, Н. В. Коровкин, В. Л. Чечурин]. – СПб. : Питер, 2003. – Т. 3. – 377 с.
6. Коровкин Н. В. Теоретические основы электротехники : сборник задач / Н. В. Коровкин, Е. Е. Селина, В. Л. Чечурин. – СПб. : Питер, 2006. – 512 с.
7. Аполлонский С. М. Теоретические основы электротехники. Электромагнитное поле / С. М. Аполлонский. – СПб. : Лань, 2012. – 592 с.

УДК 658.345

Савчук С. И.

ЛЬГОТЫ И КОМПЕНСАЦИИ ЗА РАБОТУ ВО ВРЕДНЫХ ИЛИ ТЯЖЕЛЫХ УСЛОВИЯХ ТРУДА

Аннотация. *В статье описаны вопросы предоставления специфических льгот, таких как выдача бесплатного молока и замещающих его продуктов, нормы и порядок обеспечения подсоленной водой, мылом и некоторых других. Подробно описан порядок обеспечения работников молоком, лечебно-профилактическим питанием, газированной подсоленной водой, а также мылом и обеззараживающими средствами. Показано, что предоставление всех этих льгот осуществляется исключительно на основании действующего законодательства, вне зависимости от проведения специальной оценки условий труда. Делаются ссылки на редкие, малознакомые современным специалистам, документы и положения. Сделан обзор законодательной и нормативной базы предоставления некоторых льгот работающим во вредных и тяжелых условиях труда.*

Ключевые слова: *выдача молока, лечебно-профилактическое питание, мыло и обеззараживающие средства.*

Савчук С. І.

ПІЛЬГИ ТА КОМПЕНСАЦІЇ ЗА РОБОТУ В ШКІДЛИВИХ АБО ВАЖКИХ УМОВАХ ПРАЦІ

Анотація. *У статті описано питання надання специфічних пільг, таких як: видача безкоштовного молока та продуктів, що його заміщають, норми і порядок забезпечення підсоленою водою, милом і деяких інших пільг. Детально описано порядок забезпечення працівників молоком, лікувально-профілактичним харчуванням, газованою підсоленою водою, а також милом і знезаражувальними засобами. Показано, що надання всіх цих пільг здійснюється виключно на підставі чинного законодавст-*

ва незалежно від проведення спеціальної оцінки умов праці. Робляться посилання на рідкісні, малознайомі сучасним фахівцям документи та положення. Зроблено огляд законодавчої та нормативної бази надання деяких пільг тим, хто працює у шкідливих та важких умовах праці.

Ключові слова: *видавання молока, лікувально-профілактичне харчування, мило та знезаражувальні засоби.*

Savchuk S. I.

BENEFITS AND COMPENSATIONS FOR WORK UNDER ARDUOUS AND HARMFUL LABOUR CONDITIONS

Summary. *The article discusses the issue of specific benefits, such as free provision of milk and its substitutes, the ratio and procedure of salted water, soap, and other agents supply. The procedure of supplying employees with milk, special dietary nourishment and meals, salted carbonated water, soap, and antiseptic agents, is discussed in detail. The article points out that these benefits are guaranteed under the current legislation and are not dependant upon the workplace labor condition compliance certification. It refers to rare and lesser-known documents and regulations and gives the overview of legislative and regulatory framework pertaining specific benefits for employees who work under arduous and harmful labor conditions.*

Key words: *delivery of milk, preventive nutrition, soap and neutralizing agents.*

Постановка проблемы. Законодательства ведущих мировых стран, в том числе и России, декларируют право работников на охрану жизни и здоровья в ходе трудовой деятельности. Объектом правовой защиты является человек, его права и свободы, гарантии их реализации. Право граждан на труд устанавливается конституционными [1] или иными законодательными нормами. При этом предусматривается, что это право должно быть обеспечено в условиях, отвечающих требованиям безопасности и гигиены.

Законодательство [2; 3] об охране труда на высшем государственном уровне защищает конституционные права граждан на охрану жизни и здоровья в ходе их трудовой деятельности, однозначно определяя отношения между собственником предприятия и работником в вопросах безопасности, гигиены труда, а также устанавливает общий порядок организации охраны труда.

На работодателя возлагается обязанность обеспечения функционирования на предприятии системы управления охраной труда, внедрение мероприятий по выявлению рисков и опасностей, их ликвидации или снижению уровня. Кроме того, вступление в ВТО, расширение сотрудничества с ЕС требует приведения к мировым нормам не только законодательства, нормативов и стандартов, но и самой структуры экономики, включая охрану труда.

В условиях перехода к рыночной экономике характерными причинами несчастных случаев на производстве становятся плохая организация труда, халатность, нарушение трудовой дисциплины, снижение качества контроля, которые зачастую приводит не только к травмам рабочих, но и к летальному исходу.

В такой ситуации особо важным становится контроль службами охраны труда за правами и льготами работникам, определенными действующим законодательством и закрепленными в коллективных договорах. Основой снижения уровня производственного травматизма и тяжести труда работников предприятия, сохранения их здоровья, трудоспособности и повышения эффективности трудовой деятельности всегда были и остаются внедрение новых технологий и повышение квалификации работников, полноценное финансовое обеспечение безопасных условий труда, соблюдение и совершенствование трудового законодательства.

На современном постсоветском пространстве имеет место обострение проблем в области условий труда. Продолжающийся и углубляющийся экономический кризис самым существенным образом затронул сферу охраны труда. Прогнозируемым итогом этого кризиса стало ухудшение условий труда и, как неизбежное следствие, увеличение производственного травматизма, рост числа профессиональных заболеваний, увеличение количества летальных исходов от несчастных случаев. Все большее количество людей работает во вредных или в тяжелых условиях. Обслуживание объектов повышенной опасности увеличивает психофизиологическую напряженность работников, при этом растет количество и тяжесть сердечнососудистых и психических заболеваний. В этих условиях особое значение приобретает четкость отработки предоставления льгот и компенсаций работникам.

Анализ литературных источников. Не смотря на то, что на законодательном и отраслевом уровнях достаточно подробно проработаны вопросы предоставления льгот и компенсаций за работу во вредных или тяжелых условиях труда, таких как доплаты за работу во вредных и/или тяжелых условиях труда, сокращенный рабочий

день, увеличение продолжительности оплачиваемого отпуска и льготное пенсионное обеспечение [3–7], отдельные вопросы предоставления специфических льгот, таких как выдача бесплатного молока и замещающих его продуктов, нормы и порядок обеспечения подсоленной водой, мылом и некоторые другие освещены явно недостаточно. Отдельные публикации [8–10] разрознены, имеют обзорный характер, зачастую только упоминают об этих льготах, не давая целостной картины возможности их применения в народном хозяйстве страны.

Цель настоящей **статьи** – на основании действующего законодательства и нормативных актов описать порядок обеспечения работающих во вредных и тяжелых условиях труда молоком или равноценными пищевыми продуктами, лечебно-профилактическим питанием (ЛПП), газированной соленой водой, специальной одеждой, обувью и другими средствами индивидуальной защиты, а также смывающими (мыло) и обезвреживающими средствами.

Изложение основного материала. На предприятиях, независимо от формы собственности, где имеются, хранятся или применяются технологические процессы, оборудование, сырье и материалы, которые могут быть источниками вредных и опасных производственных факторов, проводится специальная оценка условий труда [11]. Целью специальной оценки условий труда является регулирование отношений между собственником и работниками в сфере обеспечения прав работников на здоровые и безопасные условия труда, определение льгот и компенсаций за работу во вредных и опасных условиях.

Отнесение рабочего места к классу рабочего места с вредными условиями труда возможно только на основании специальной оценки условий труда, которая выявляет наличие на рабочем месте вредных и опасных производственных факторов и причины их возникновения, определяет возможность и характер предоставления льгот и компенсаций работникам.

Именно по результатам такой оценки назначаются льготы и компенсации, предусмотренные действующим законодательством. К таким льготам и компенсациям относятся право работника на льготное пенсионное обеспечение по Спискам № 1 и № 2, конкретная продолжительность ежегодного дополнительного отпуска за работу во вредных и тяжёлых условиях труда, размеры доплат за работу во вредных и тяжёлых условиях труда (касается работников немедицинских профессий) и право работника на сокращённую продолжительность рабочей недели.

Однако существуют еще некоторые обязательства работодателя перед работниками, которые также можно отнести к льготам, и выполнение которых не зависит от проведения специальной оценки условий труда. Эти обязательства предусматриваются различными нормативными документами и являются обязательными для выполнения на предприятиях всех форм собственности. Статья 221 Трудового кодекса РФ [2] гласит: «На работах с вредными и (или) опасными условиями труда, а также на работах, выполняемых в особых температурных условиях или связанных с загрязнением, работникам бесплатно выдаются специальная одежда, специальная обувь и другие средства индивидуальной защиты, смывающие и (или) обезвреживающие средства», а согласно статьи 222 «…На работах с вредными условиями труда работникам выдаются бесплатно по установленным нормам молоко или другие равноценные пищевые продукты» и «... на работах с особо вредными условиями труда предоставляется бесплатно по установленным нормам лечебно-профилактическое питание».

Молоко. Нормы и порядок бесплатной выдачи молока или равноценных пищевых продуктов утверждены Приказом № 45н Министерства здравоохранения и социального развития РФ от 16.02.2009 г. [12]. Согласно этому Приказу, обязательная бесплатная выдача молока или равноценных продуктов предусмотрена для работников, которые в ходе своей производственной деятельности имеют дело с определенными химическими веществами (всего 54 наименования). Все эти вещества перечислены в приложении к Постановлению Госкомтруда СССР № 731 [13]. Кроме того, бесплатное молоко также получают работники, контактирующие в том или ином виде с радиоактивными веществами в открытом виде.

Перечень рабочих мест, на которых по результатам аттестации положено бесплатно выдавать молоко или равноценные пищевые продукты, администрация предприятия согласует с профсоюзом и оформляет в виде приложения к коллективному договору. Работник, рабочее место которого есть в этом списке, получает молоко или равноценные продукты питания каждую смену, независимо от ее продолжительности, но лишь тогда, когда он занят именно на работах, связанных с производством или применением вышеупомянутых вредных веществ.

Бесплатная выдача работникам молока или других равноценных пищевых продуктов производится с учетом следующих условий:

- молоко выдается в объеме 0,5 литра за смену независимо от ее продолжительности, только в дни фактической занятости работника на работах, связанных с производством или применением химических веществ, предусмотренных в Перечне;

- выдача и употребление молока осуществляется в буфетах, столовых или в специально оборудованных в соответствии с санитарно-гигиеническими требованиями помещениях;
- запрещается заменять молоко другими товарами и продуктами (кроме равноценных – кефира, простокваши, мацони и т. д.), выдавать молоко за одну или несколько смен вперед, равно как и за прошедшие смены, а также отпускать его на дом;
- работникам, получающим бесплатно лечебно-профилактическое питание в связи с особо вредными условиями труда, молоко не выдается;
- выдача работникам по установленным нормам молока или других равноценных пищевых продуктов может быть заменена по письменным заявлениям работников компенсационной выплатой в размере, эквивалентном стоимости молока или других равноценных пищевых продуктов.

Решением трудового коллектива все расходы по бесплатной выдаче молока либо относятся на себестоимость выпускаемой продукции, либо производятся со счета социального развития предприятия. Бюджетные организации производят такую оплату за счет бюджетных ассигнований.

Прием молока разрешается исключительно в буфетах, столовых или в иных, специально оборудованных помещениях, которые обязательно должны отвечать санитарно-гигиеническим требованиям. Запрещается размещение молокораздаточных пунктов в подвалах и непосредственно на территории производственных цехов. Помещение молокораздаточного пункта должно быть светлое, сухое, хорошо отапливаемое, оборудованное водопроводом, канализацией и приточно-вытяжной вентиляцией. Желательно наличие в этом помещении холодильника, пастеризатора, ванн для мытья посуды и умывальников.

Молоко, выдаваемое работникам, должно быть расфасовано в бутылки или пакеты. При невозможности обеспечения расфасованным молоком, продукт должен быть прокипячен или пастеризован. Категорически запрещается выдавать молоко в посуду, предлагаемую самим работником.

Лечебно-профилактическое питание. Порядок и правила выдачи ЛПП утвержден Приказом № 46н Министерства здравоохранения и социального развития РФ от 16.02.2009 г. [14]. Здесь же утверждены нормы, рационы и Перечень производств, профессий и должностей, работа на которых в связи с особо вредными условиями труда предусматривает бесплатное получение лечебно-профилактического питания.

Перечень производств, на которых работники должны получать ЛПП:

- химические производства неорганических продуктов, органических продуктов, лаков и красок, химических реактивов;
- горные работы и химико-фармацевтические производства;
- производства цветной металлургии;
- электротехнические и радиотехнические производства;
- производства ртутных термометров;
- работы с радиоактивными веществами и источниками ионизирующих излучений;
- работы по погрузке и разгрузке апатита в морских и речных портах;
- работы в условиях повышенного атмосферного давления;
- производства черной металлургии;
- производства пищевой промышленности.

В зависимости от профессий и должностей работников, сегодня действует 6 различных рационов лечебно-профилактического питания, имеющих энергетическую ценность от 1368 до 1466 кКал. Кроме того, предусмотрена бесплатная выдача витаминов С, А, РР, В15, В2, а некоторые рационы предписывают дополнительно минеральную столовую воду («Нарзан») и овощи и фрукты, не прошедшие термической обработки.

ЛПП работникам выдают исключительно в дни фактического выполнения ими работы на производствах, предусмотренных вышеупомянутым перечнем, а также в дни временной нетрудоспособности, если заболевание профессиональное и больной не госпитализирован.

Также лечебно-профилактическим питанием обеспечивают следующих лиц:

- работников, занятых на строительных, строительно-монтажных, ремонтно-строительных, пусконаладочных работах, которые работают полный рабочий день на действующих производствах с особо вредными условиями труда, на которых как для основных работников, так и для ремонтного персонала установлено это питание;
- рабочих, выполняющих очистку и подготовку оборудования к ремонту или консервации в цехе (на участке);
- инвалидов вследствие профессионального заболевания, которые пользовались ЛПП непосредственно перед наступлением инвалидности, вызванной характером их работы, – до прекращения инвалидности, но не более 6 месяцев со дня ее установления;
- работников, которые имеют право на бесплатное получение ЛПП и которые временно переведены на другую работу в связи с начальными признаками профессионального за-

болевания, вызванного характером их работы, – на срок не более 6 месяцев;

- женщин, занятых до наступления отпуска по беременности и родам на производствах, профессиях и должностях, дающих право на бесплатное получение ЛПП, – на все время отпуска по беременности и родам.

Беременные женщины, работающие в условиях, предусматривающих получение ЛПП, как правило, на период беременности переводятся на другую работу. Однако они продолжают получать бесплатное ЛПП вплоть до наступления отпуска по беременности и родам, а также на весь период этого отпуска.

Обычно ЛПП – это горячий завтрак перед началом работы. Однако при отсутствии возражений со стороны медицинской части допускается предоставление ЛПП в обеденный перерыв. Категорически запрещается отпуск ЛПП на дом. Исключением из этого правила является питание больных, инвалидов и кормящих матерей.

Также запрещены выдача ЛПП авансом, за прошедшее время и компенсация денежными выплатами, за исключением случаев, когда работа связана с разъездами по производственной необходимости.

ЛПП не выдается в следующие периоды:

- в нерабочие дни;
- в дни отпуска;
- в дни служебных командировок;
- в дни обучения с отрывом от производства;
- в дни выполнения работ на других участках, где лечебно-профилактическое питание не установлено;
- в дни выполнения государственных и общественных обязанностей;
- в период временной нетрудоспособности при общих заболеваниях;
- в дни нахождения в больнице или санатории на лечении, а также в период нахождения в профилактории.

Для организации на предприятии лечебно-профилактического питания следует заключить договор с предприятием общественного питания, которое имеет все необходимые разрешительные документы для осуществления такой деятельности и полностью соответствует санитарно-гигиеническим нормам и правилам. Приготовление блюд, соответствующих упомянутым рационам питания, имеют право осуществлять только квалифицированные дипломированные повара. При этом состав меню, порядок приготовления и выдачи ЛПП обязательно должны контролироваться медицинским персоналом предприятия. Ответственность за полноту и правильность меню, всего комплекса работ, связанных с приготовлением ЛПП работников, возлагается на предприятие общественного питания, что особо отражается в заключенном с ним договоре. Допускается замена в меню одних блюд другими при обязательном соблюдении установленной для рациона нормы продуктов.

Предприятие направляет предприятию общественного питания, с которым заключен договор об обеспечении работников ЛПП, количество и рационы питания по всем категориям работников, получающим ЛПП. Предприятие общественного питания обязуется приготовить заказанное ему ЛПП индивидуально, для каждого работника по полученной от предприятия заявке, точно к указанному времени. Ответственность за весь комплекс работ по организации лечебно-профилактического питания работников несет руководство предприятия.

Газированная вода. Действующее по сей день Обязательное постановление Секретариата ВЦСПС «О снабжении работников горячих цехов газированной подсоленной водой» от 11.06.34 г. [15] обязывает руководство предприятия обеспечить работников горячих цехов газированной соленой водой. Здесь же приведен перечень горячих цехов и производственных участков, на которых следует организовать снабжение газированной соленой водой. В этом перечне доменные, мартеновские, прокатные цехи, обжигальные и прочие цехи металлопромышленности, гуты стекольных заводов, горны фарфорофаянсовых и кирпичных заводов, котельные и машинные залы электростанций, где проводятся работы при высоких температурах.

Работники горячих участков должны быть обеспечены газированной углекислотой водой по норме 4–5 л на работника за смену. Вода должна содержать 0,5% поваренной соли. Объем сатуратора рассчитывают исходя из этой нормы и в зависимости от количества работников. Сатуратор должен быть установлен в каждом горячем цехе. Допускается установка одного сатуратора с последующим развозом воды по рабочим местам в баллонах, при этом емкость такого сатуратора должна обеспечивать потребность в газированной воде всех нуждающихся в ней работников.

Здесь следует сказать, что наличие на рабочих местах в требуемом объеме газированной подсоленной воды не отменяет обязанности руководства предприятия обеспечить всех нуждающихся качественной пресной водой.

Оценка обеспеченности работников средствами индивидуальной защиты. Как уже говорилось, обеспечение работников спецодеждой, специальной обувью и другими средствами индивидуальной защиты, смывающими и обезвреживающими средствами предусмотрено статьей 221 Трудового кодекса РФ и исполняется в соот-

ветствии с Приказом 290н от 01.06.2009 г. Министерства здравоохранения и социального развития РФ [16]. В ходе аттестации рабочих мест по условиям труда делается оценка обеспеченности работников средствами индивидуальной защиты, а также эффективность и достаточность этих средств. Оценка производится путем сопоставления выданных средств с Типовыми отраслевыми нормами бесплатной выдачи спецодежды, спецобуви и других средств индивидуальной защиты, утвержденными постановлением Государственного комитета СССР по труду и социальным вопросам и Президиума Всесоюзного Центрального Совета Профессиональных Союзов от 18 августа 1980 г. № 241/П-9, дополненными и измененными постановлением этих органов от 21 августа 1985 г. № 289/П-8, и с другими нормативными документами.

На работах с вредными и опасными условиями труда, а также на работах, связанных с загрязнением или неблагоприятными метеорологическими условиями, работникам, в соответствии с установленными нормами, бесплатно выдается специальная одежда, специальная обувь и иные средства индивидуальной защиты, а также моющие и обеззараживающие средства.

Работодатели, в соответствии с нормативно-правовыми актами по охране труда и коллективным договором, обязаны приобретать и выдавать за счет собственных средств специальную одежду, специальную обувь и другие средства индивидуальной защиты в соответствии с установленными нормами работникам, занятым на работах с вредными и (или) опасными условиями труда. В случае досрочного износа этих средств не по вине работника, работодатель обязан за свой счет заменить их. В случае приобретения работником за свои средства спецодежды, иных средств индивидуальной защиты, моющих и обеззараживающих средств работодатель обязан компенсировать все затраты на условиях, предусмотренных коллективным договором.

В соответствии с коллективным договором работодатель может дополнительно сверх установленной нормы выдавать работникам определенные средства индивидуальной защиты, если фактические условия труда работника требуют их применения. Средства индивидуальной защиты работников, в том числе и иностранного производства, должны соответствовать требованиям охраны труда и иметь сертификаты соответствия. Приобретение и выдача работникам средств индивидуальной защиты, не имеющих сертификата соответствия, не допускается.

Оценка обеспеченности работников средствами индивидуальной защиты оформляется протоколом. Оценка фактического состояния условий труда на рабочих местах состоит из следующих оценок:

- степени вредности и опасности;
- степени травмобезопасности;
- обеспеченности работников средствами индивидуальной защиты, а также эффективности этих средств.

При оценке обеспеченности работников средствами индивидуальной защиты одновременно производится оценка соответствия выданных средств индивидуальной защиты фактическому состоянию условий труда на рабочем месте, а также производится контроль их качества.

Мыло и обезвреживающие средства. Статья 221 Трудового кодекса [2] обязывает работодателей за счет предприятия обеспечивать работников мылом на работах, связанных с загрязнением, и смывающими и обезвреживающими средствами на работах, где возможно влияние на кожу вредно действующих веществ. Эти требования изложены в приказе № 1122н от 17.12.2010 г. Министерства здравоохранения и социального развития РФ [17]. Документ требует от работодателя бесплатно обеспечить работающих с веществами, вызывающими раздражение кожи рук, дополнительно к смывающим и обезвреживающим средствам выдавать профилактические пасты и мази, а также четко указывает на количественные характеристики обеспечения. В цехах должны быть установлены гидранты для смывания попавших на кожу токсичных веществ, фонтанчики для промывания глаз, а также душевые установки с большим водным напором.

Кроме того, постановлением НКТ РСФСР от 06.08.22 г. предписано, что мыло на предприятии должно постоянно иметься возле умывальников в течение работы по ее окончании, а также возле умывальников обязательно должны быть средства для сушки рук – полотенца или воздушные сушки.

Выводы. Государство проявляет постоянную заботу о своих гражданах, особенно о тех, которые работают во вредных и опасных условиях труда, и эта забота является всесторонней. На государственном уровне предусмотрены такие льготы, как сокращенный рабочий день, увеличенная продолжительность оплачиваемого отпуска, доплаты за работу во вредных и опасных условиях труда, льготы по пенсионному обеспечению трудящихся, а также целый комплекс дополнительных льгот, направленных на сохранение здоровья работников. К таким льготам относятся все упоминаемые в настоящей статье мероприятия, направленные на создание комфортных условий труда, снижение уровня профессиональных заболеваний, защиту работающих от воздействия на их организмы вредных и опасных

условий труда. Это в полной мере относится и к бесплатной выдаче молока, и бесплатному лечебно-профилактическому питанию, обеспечению средствами индивидуальной защиты и специальной одеждой за счет работодателя, обезвреживающими средствами и другие действия. Информация о действующих законодательных и нормативных документах позволит специалистам в области охраны труда, а также всем желающим, получить полную актуальную информацию по рассматриваемому вопросу.

ЛИТЕРАТУРА

1. Конституция Российской Федерации в редакции 1993 г. со всеми правками и дополнениями.
2. Трудовой кодекс Российской Федерации 197-ФЗ от 30.12.2001 г. в редакции 2014 г. с изменениями и дополнениями [Электронный ресурс]. – Режим доступа : http://www.rg.ru/2001/12/31/trud-dok.html.
3. Федеральный закон «Об основах охраны труда в Российской Федерации» 181-ФЗ от 17.07.1999 г. с изменениями и дополнениями [Электронный ресурс]. – Режим доступа : http://ohranatruda.ru/ot_biblio/normativ/data_normativ/9/9269/index.php.
4. Постановление Правительства РФ «Об установлении сокращенной продолжительности рабочего времени, ежегодного дополнительного оплачиваемого отпуска, повышенной оплаты труда работникам, занятым на тяжелых работах, работах с вредными и (или) опасными и иными особыми условиями труда» № 870 от 20.11.2008 (ред. от 28.06.2012) [Электронный ресурс]. – Режим доступа : http://base.garant.ru/194384/.
5. Постановление Госкомтруда СССР и Президиума ВЦСПС «Об утверждении списка производств, цехов, профессий и должностей с вредными условиями труда, работа в которых дает право на дополнительный отпуск и сокращенный рабочий день» № 298/П-22 от 25.10.74 г.
6. Федеральный закон «О трудовых пенсиях в Российской Федерации» от 17.12.2001 № 173-ФЗ (принят ГД ФС РФ 30.11.2001) (действующая редакция от 28.12.2013). [Электронный ресурс]. – Режим доступа : http://www.rg.ru/2001/12/20/zakonpensii-dok.html.
7. Постановление Госкомитета СССР по труду «Об утверждении Типового положения об оценке условий труда на рабочих местах и порядке применения отраслевых перечней работ, на которых могут устанавливаться доплаты рабочим за условия труда» № 387/22-78 от 03.10.86 г.
8. Шадрина Т. И. Вредные условия труда: гарантии и льготы, предоставляемые работникам / Т. И. Шадрина // Оплата труда: бухгалтерский учет и налогообложение. – 2012. – № 4. – С. 37–46.
9. Охрана труда : учебное пособие для специалистов и руководителей служб охраны труда организаций / Г. З. Файнбург, А. Д. Овсянкин, В. И. Потемкин. – [8-е изд., перераб. и доп.]. – Владивосток : ФГОУ ВПО ПИГМУ, 2007. – 449 с.
10. Фролов О. П. Забота об охране труда работающих – основа повышения эффективности производства / О. П. Фролов // Кадры предприятия. – 2008. – № 4. – С. 81–90.
11. Федеральный закон РФ от 28 декабря 2013 г. № 426-ФЗ «О специальной оценке условий труда» [Электронный ресурс]. – Режим доступа : http://www.rg.ru/2013/12/30/ ocenka-dok.html.
12. Приказ Министерства здравоохранения и социального развития РФ «Об утверждении норм и условий бесплатной выдачи работникам, занятым на работах с вредными условиями труда, молока или других равноценных пищевых продуктов, порядка осуществления компенсационной выплаты в размере, эквивалентном стоимости молока или других равноценных пищевых продуктов, и перечня вредных производственных факторов, при воздействии которых в профилактических целях рекомендуется употребление молока или других равноценных пищевых продуктов» № 45н от 16.02.2009 г. [Электронный ресурс]. – Режим доступа : http://www.rg.ru/2009/ 05/22/normy-dok.html.
13. Постановление Государственного комитета СССР по труду и социальным вопросам и Президиума Всесоюзного Центрального Совета профессиональных союзов «О порядке бесплатной выдачи молока и других равноценных пищевых продуктов рабочим и служащим, занятых на работах с вредными условиями труда» № 731/П-13 от 16.12.87 г.
14. Приказ Министерства здравоохранения и социального развития РФ «Об утверждении Перечня производств, профессий и должностей, работа в которых дает право на бесплатное получение лечебно-профилактического питания в связи с особо вредными условиями труда, рационов лечебно-профилактического питания, норм бесплатной выдачи витаминных препаратов и Правил бесплатной выдачи лечебно-профилактического питания» № 46н от 16.02.2009 г. [Электронный ресурс]. – Режим доступа : http://www.rg.ru/2009/05/22/lechebnoe-pitanie-dok.html.
15. Обязательное постановление Секретариата ВЦСПС «О снабжении работников горячих цехов газированной подсоленной водой» от 11.06.34 г.
16. Приказ Министерства здравоохранения и социального развития РФ «Об утверждении межотраслевых правил обеспечения работников специальной одеждой, специальной обувью и другими средствами индивидуальной защиты» № 290н от 01.06.2009 г. [Электронный ресурс]. – Режим доступа : http://www.zdrav.ru/library/regulations/detail.php?ID=26408.
17. Приказ Министерства здравоохранения и социального развития РФ «Об утверждении типовых норм бесплатной выдачи работникам смывающих и (или) обезвреживающих средств и стандарта безопасности труда «Обеспечение работников смывающими и (или) обезвреживающими средствами» № 1122н от 17.12.2010 г. [Электронный ресурс]. – Режим доступа : http://www.rg.ru/2011/05/20/minesterstvozdrav-dok.html.