

MIESIĘCZNIK
POŁOCKI.

Т о м I.
Р о к 1818.

*«Вестник Полоцкого государственного университета»
продолжает традиции первого в Беларуси литературно-
научного журнала «Месячник Полоцкий».*



ВЕСНИК ПОЛАЦКАГА ДЗЯРЖАУНАГА УНІВЕРСІТЭТА
Серыя В. Прамысловасць. Прыкладныя навукі

У серыі В навукова-тэарэтычнага часопіса друкуюцца артыкулы, якія прайшлі рэцэнзаванне, змяшчаюць новыя навуковыя вынікі ў галіне машынабудавання і машыназнаўства, матэрыялазнаўства і металургіі, хімічнай тэхнікі і тэхналогіі.

ВЕСТНИК ПОЛОЦКОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО УНИВЕРСИТЕТА
Серия В. Промышленность. Прикладные науки

В серии В научно-теоретического журнала публикуются статьи, прошедшие рецензирование, содержащие новые научные результаты в области машиностроения и машиноведения, материаловедения и металлургии, химической техники и технологии.

HERALD OF POLOTSK STATE UNIVERSITY
Series B. Industry. Applied sciences

Series B includes reviewed articles which contain novelty in research and its results in mechanical engineering and machine science, material authority and metallurgy, applied chemistry.

Адрес редакции:
Полоцкий государственный университет, ул. Блохина, 29, г. Новополоцк, 211440, Беларусь
тел. + 375 (214) 53 34 58, e-mail: vestnik@psu.by

Отв. за выпуск В.П. Иванов, Н.Н. Попок.
Редактор Р.Н. Авласенок. Техн. редактор Р.Н. Авласенок.
Подписано к печати 30.08.2012. Формат 60×84¹/₈. Бумага офсетная. Ризография.
Усл. печ. л. 17,44. Уч.-изд. л. 21,02. Тираж 100 экз. Заказ 1405.

МАШИНОСТРОЕНИЕ

УДК 621.91.04

ОСОБЕННОСТИ ПОСТРОЕНИЯ ФОРМООБРАЗУЮЩИХ СИСТЕМ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ОБОРУДОВАНИЯ МОДУЛЬНОГО ТИПА ДЛЯ РАСКРОЯ МАТЕРИАЛОВ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИМ ЛУЧОМ

д-р техн. наук, проф. В.А. ДАНИЛОВ, канд. техн. наук Р.А. КИСЕЛЕВ
(Полоцкий государственный университет);
В.С. КРУТЬКО
(ГНПО «Центр» НАН Беларуси, Минск)

Рассмотрены задачи функционального и компоновочного проектирования технологического оборудования модульного типа для раскроя материалов с применением источников концентрированной энергии с учетом направлений его развития, реализуемых технологий формообразования. Дана характеристика основных этапов разработки такого оборудования, принципов соответствия и преемственности технических решений при модульном проектировании. Исходя из системной модели технологий формообразования и структуры способа обработки рассмотрены задачи типизации и формирования состава модулей оборудования, синтеза рациональных схем формообразования энергетическим лучом линейчатых поверхностей и их сопряжений между собой, пути реализации схем формообразования соответствующими модулями при создании нового и модернизации существующего технологического оборудования.

Введение. Создание и совершенствование оборудования для раскроя конструкционных материалов плазменным и гидроабразивным методами имеет важное технико-экономическое значение благодаря преимуществам и эффективности этих методов заготовительного производства. Современным направлением в создании технологического оборудования является его модульное построение [1] на базе унифицированных компонентов определенного функционального назначения, обеспечивающее:

- уменьшение стоимости оборудования, сокращение сроков его проектирования и запуска в производство благодаря широкому применению унифицированных устройств;
- гибкость системы проектирования – возможность построения множества компоновок различного технологического оборудования из одних и тех же модулей;
- упрощение модернизации за счет установки более совершенных и дополнительных модулей с целью повышения производительности и расширения технологических возможностей оборудования;
- повышение надежности, упрощение диагностики, технического обслуживания и ремонта оборудования благодаря использованию апробированных устройств;
- возможность экономичного централизованного изготовления модулей, комплектующих механизмов, деталей и др.

Эффективность модульного проектирования повышается при наличии типовых решений, унификации модулей. В этой связи практическое значение имеет развитие методологических основ модульного построения технологического оборудования, в частности решения соответствующих задач функционального и компоновочного проектирования (типизация и формирование состава модулей, разработка схем формообразования поверхностей и реализующих их механизмов, формирование и анализ структурных и функциональных связей в исполнительной системе станка и др.).

Рассмотрим некоторые из этих задач с учетом тенденций развития рассматриваемого оборудования, которые не нашли должного отражения в научно-технической литературе.

Тенденции развития оборудования для раскроя материалов. При проектировании оборудования для раскроя материала следует учитывать накопленный зарубежный и отечественный опыт создания и применения такого оборудования. Несмотря на различие в реализуемых механизмах разрушения материала, кинематика и компоновка оборудования для раскроя материала разными методами близки друг другу, так как реализуются схожие схемы формообразования. Это позволяет выделить *общие тенденции* данного оборудования *в направлении повышения его технического уровня, универсальности, производительности и качества резки* [2]. К ним, в частности, относятся:

- 1) расширение технологических возможностей оборудования за счет увеличения типов применяемых на нем инструментов (плазматронов, головок для гидроабразивной резки, устройств для механической обработки и т.п.). Например, дополнительно к плазматрону на станке могут быть установлены газовый резак, сверлильная головка, маркер-разметчик линий сгиба на вырезаемых деталях и мест свер-

ления отверстий и другие устройства. Повышение универсальности оборудования портального типа достигается также при его оснащении дополнительным манипуляционным модулем, обеспечивающим пятикоординатную обработку при выполнении профильной резки, реза со скосом, снятии фасок, а также за счет введения дополнительной угловой координаты для сообщения вращательного движения заготовке, например, при раскroe труб;

2) повышение производительности оборудования за счет установки на нем нескольких (на практике до 8 – 10 шт.) одновременно работающих рабочих органов, осуществляющих вырезание одинаковых или разных изделий;

3) совершенствование конструкции режущих устройств и технологии резки, оптимизация условий резания для повышения производительности и точности вырезаемых деталей, снижения энергозатрат;

4) создание оборудования комбинированного типа, например, для плазменного раскроя из листового и трубного проката. В этом случае станок оснащается столом для установки плоских заготовок, вращателем для установки заготовок круглой формы и соответствующей системой программного управления. По этому принципу модернизируют существующее оборудование для раскроя плоского материала;

5) реализация на станке комбинированных способов раскроя материалов в сочетании плазменной и гидроабразивной резки и других методов;

6) возможность ведения процесса резания в различных средах. Так, в ГНПО «Центр» НАН Беларуси разработаны и серийно выпускаются автоматизированные комплексы плазменной резки как в воздушной среде (КПР-01), так и в водной (КПР-02) [3], что значительно расширяет универсальность этого оборудования. Наличие водной среды упрощает реализацию на одном станке технологий раскроя материалов комбинированными методами – плазменной и гидроабразивной резкой;

7) оснащение оборудования для гидроабразивной резки материалов динамической режущей системой с активным контролем угла наклона энергетического луча, что позволяет без ухудшения качества повысить скорость резки, корректировать конусность обрабатываемых отверстий, обеспечить перпендикулярность реза поверхности заготовки, изменяя автоматически с помощью системы управления угол подачи струи воды;

8) переход от электромеханического привода координатных перемещений к приводу на основе линейного электродвигателя. На этом принципе основана, например, исполнительная система комплекса для гидроабразивной резки материалов КПР-1 конструкции ГНПО «Центр» [4]. Благодаря отсутствию между подвижной и неподвижной частями промежуточных устройств обеспечиваются более высокие динамические характеристики привода и точность перемещений рабочих органов, повышается надежность и долговечность исполнительной системы.

Типизация и формирование состава модулей. Модульное построение особенно эффективно для оборудования с близкими по кинематике схемами формообразования и реализуемыми методами обработки. Например, методам обработки с высокой концентрацией энергетического потока (гидроабразивная, лазерная, плазменная резка и др.) присущи общие приемы осуществления, основанные на многокоординатном перемещении энергетического потока (луча), воздействующего на материал заготовки. Это позволяет применять в соответствующем оборудовании однотипные модули.

Анализ необходимых технологических блоков для осуществления этих методов обработки, а также выделение в обрабатывающих системах общих элементов, объединенных функциональным назначением, показывает, что ими в рассматриваемом оборудовании являются исполнительные устройства с приводами координатных перемещений и системы управления. Поэтому эти компоненты в большей степени соответствуют модульному построению оборудования и могут быть унифицированы. Такое построение основано на соблюдении принципов совместимости структурных компонентов оборудования и предъявляет определенные требования к их проектированию, в частности:

- возможность стыковки отдельных модулей с обеспечением передачи информации и энергии как между ними, так и через них;

- функциональную согласованность и дополняемость отдельных модулей, что позволяет, например, существенно повысить производительность оборудования для раскроя материала за счет обеспечения возможности одновременной работы нескольких модулей;

- технологическая надежность и безопасность создаваемого оборудования.

При технико-экономической целесообразности по модульному принципу могут быть построены и отдельные модули.

Основой модульного построения технологического оборудования для обработки изделий машиностроения механическими и физико-техническими методами служат системная модель технологий формообразования и структура способа обработки [5; 6], исходя из которых может быть сформирован состав исполнительных модулей как компонентов формообразующей системы технологического оборудования. При решении этой задачи следует руководствоваться общими принципами типизации и формирования исполнительных модулей.

Типизация модулей основана на представлении технологии формообразования как совокупности потоков энергии, информации, материалов, обеспечивающих обработку изделия. Соответственно можно выделить энергетические, информационные, манипуляционные и обрабатывающие модули.

Энергетические модули служат для преобразования и передачи энергии в обрабатывающей системе от источника энергии исполнительным органам. К энергетическим модулям относятся, например, встраиваемые в технологическое оборудование источники постоянного тока, частотные преобразователи для питания двигателей переменного тока.

Информационные модули обеспечивают хранение, преобразование и передачу информации в процессе формообразования. Они могут быть механического, электромеханического и немеханического (электронного типов). Механическими информационными модулями в оборудовании для раскрытия материала с копировальными системами являются копиры. К электромеханическим информационным модулям можно отнести элементы автоматики систем циклового программного управления технологическим оборудованием. Современными немеханическими информационными модулями в рассматриваемом оборудовании являются устройства числового программного управления.

Манипуляционные (кинематические) модули входят в кинематическую подсистему формообразующей системы и предназначены для создания вспомогательных, настроечных, ориентирующих и рабочих относительных перемещений инструмента и заготовки.

Обрабатывающие модули служат для энергетического воздействия на материал заготовки, которое может осуществляться физико-техническими и механическими методами. В рассматриваемом оборудовании к ним относятся устройства для лазерной, плазменной и гидроабразивной резки, сверлильные головки и др.

Модульное построение формообразующих систем технологического оборудования предполагает соблюдение *принципов соответствия и преемственности* на разных стадиях проектирования. Так, при проектировании кинематики оборудования используются кинематические модули, при разработке его компоновки – компоновочные модули, а при конструировании узлов – конструкторские модули. В этом находит отражение принцип соответствия проектных решений. Указанные модули разрабатываются с учетом преемственности технических решений. Применение принципа преемственности выражается, в частности, в том, что компоновочные и конструкторские модули строятся на основе кинематических модулей. В этой связи решение задач синтеза и оптимизации структуры кинематических модулей имеет первостепенное значение при проектировании формообразующих систем технологического оборудования.

Формирование состава и структуры модулей обусловлено функциями конкретной подсистемы, включающей данные модули. Так, кинематическая подсистема станка, обеспечивающая исполнительные перемещения рабочих органов, может включать в себя модули кинематических цепей механического, немеханического или комбинированного типов, которые в зависимости от состава создаваемых движений исполнительных органов могут иметь бездифференциальную или дифференциальную структуру [7]. Таким образом, формообразующая система оборудования определяется в значительной мере составом и структурой кинематических модулей.

По функциональному назначению можно выделить следующие типы кинематических модулей:

- обеспечивающие возможность получения определенного по траектории движения (поступательного, вращательного, винтового и др.);
- служащие для преобразования одного вида движения в другое – вращательное в поступательное или качательное и т.п.;
- для сложения движений (дифференциальные модули);
- для настройки параметров исполнительного движения (скорости, направления, траектории), согласования движений нескольких исполнительных органов и др.

По конструктивным и эксплуатационным соображениям (обеспечение компактности и ремонтно-пригодности узла, удобства настройки и т.п.) отдельные элементарные модули, например, для сложения и настройки движений могут быть объединены в один модуль.

Универсальность формообразующей системы станка определяется множеством реализуемых на нем методов обработки, каждый из которых осуществляется соответствующим инструментальным (рабочим) модулем, поэтому обрабатывающая подсистема формообразующей системы включает множество необходимых рабочих модулей. Например, обрабатывающая подсистема универсального станка для раскрытия материала, кроме модулей для воздействия на материал заготовки энергетическим лучом (плазменная и гидроабразивная резка), может иметь также модули для механической обработки (сверление отверстий и др.).

Применение на одном станке разных технологий резки позволяет реализовать преимущества каждой из них: как известно, гидроабразивная резка обеспечивает более высокие качественные параметры резки, а для плазменной резки требуются меньшие производственные расходы. Сверление может быть более эффективным по производительности и затратам энергии по сравнению с обработкой отверстий

энергетическим лучом. Поэтому комплексное применение на станке различных методов обработки, кроме универсальности, обеспечивает также его более высокие технико-экономические показатели.

В общем случае обрабатывающие модули могут быть в составе оборудования *постоянными и сменными*. Необходимость применения как постоянных, так и сменных модулей следует учитывать при проектировании кинематической структуры и компоновки, конструировании узлов оборудования. Выполнение этого условия в первом случае связано с типизацией структур кинематических связей, выделением и анализом типовых кинематических модулей, разработкой на их базе кинематической структуры станка, а также конструктивных модулей как сборочных единиц технологического оборудования.

Компоновка же станка должна обеспечить соответствующую его универсальности совокупность «технологических модулей», каждый из которых состоит из блоков, необходимых для создания определенного исполнительного движения [8]. Количество технологических модулей, формируемых из блоков данной компоновки, определяется его кинематической структурой, устанавливающей связи между исполнительными органами и источниками движения.

Это обстоятельство обуславливает необходимость комплексного подхода к проектированию механики и компоновки оборудования модульного типа.

Типовые решения по формированию состава исполнительных модулей обрабатывающей системы станка должны базироваться на принципиальных кинематических схемах обработки, учитывая, что перемещение энергетического луча в пространстве в зависимости от формы направляющей линии, ее положения и вида движения (прямолинейное, вращательное, винтовое) позволяет формировать соответствующими модулями различные линейчатые поверхности (в виде плоскости, цилиндра, конуса, однополосного гиперболоида, геликоида и др.), сочетание которых определяет геометрию обработанной поверхности.

Этапы разработки технологического оборудования модульного типа. Исходя из изложенного можно определить основные этапы разработки технологического оборудования модульного типа с источниками концентрированной энергии.

1. *Выработка общей концепции проектирования*, определяющей методы энергетического, информационного и силового взаимодействия элементов системы. На данном этапе необходимо обосновать реализуемые физические процессы, обеспечивающие эффективное разрушение материала, задать систему координатных перемещений с позиции формирования траектории для достижения требуемых универсальности и точности оборудования, механику механизмов перемещения носителя энергетического потока в координатной системе станка, выбрать систему управления процессами обработки и контроля и т.д.

2. *Обоснование построения компоновки*, определяющей необходимость и достаточность модулей системы, их совместимость (стыкуемость) и относительную ориентацию, обусловленную технологией обработки. Качество компоновки оценивается через характеристики рабочей зоны (поля) как критерий, определяющий технологические возможности оборудования [5]. Компоновка и рабочее поле зависят от реализуемой в проектируемом оборудовании системы координатных перемещений (рис. 1).

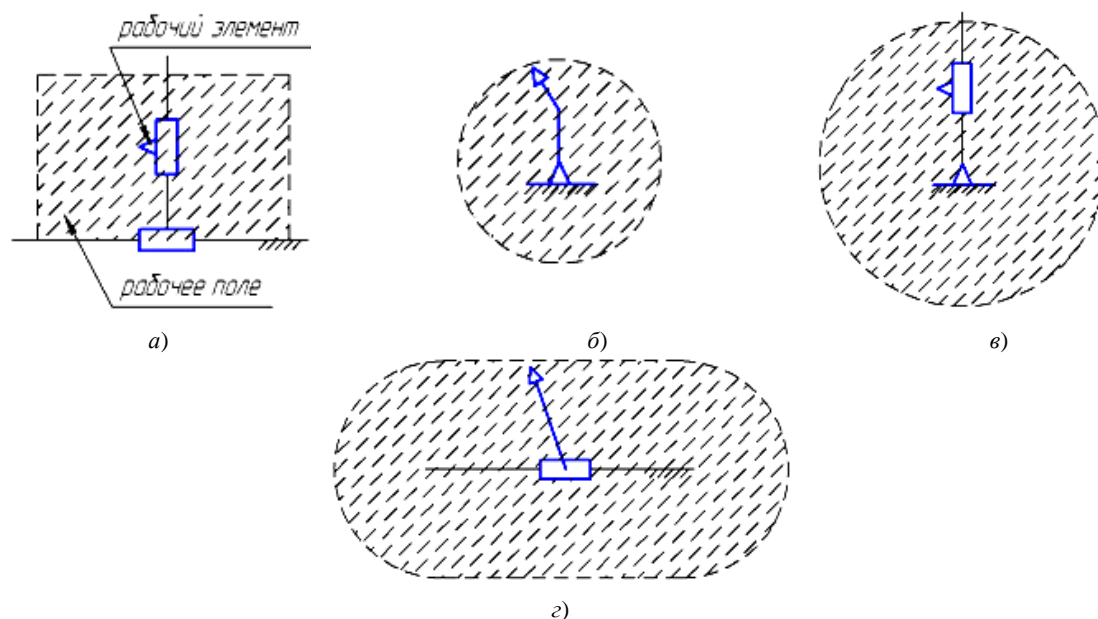


Рис. 1. Схемы исполнительных устройств с двумя прямолинейными координатными перемещениями (а), с двумя вращательными движениями (б), с вращательным и поступательными движениями (в), с поступательным и вращательными движениями (з)

В компоновках высокоэнергетического оборудования для раскроя материала наряду с наиболее распространенной декартовой системой координат, основанной на прямолинейных перемещениях (рис. 1, а), в ряде случаев исходя из геометрии формируемых поверхностей целесообразно применять системы координатных перемещений, построенные на вращательных движениях (рис. 1, б), а также на сочетании вращательного и поступательного движений (рис. 1, в, г), которые определяют кинематику обрабатываемой системы и ее рабочее поле. Такие системы, несмотря на определенные сложности реализации, имеют определенные преимущества как в технологическом, так и в эксплуатационном плане при вырезании изделий по криволинейным траекториям. Например, более высокая точность формирования круглых изделий, чем при формировании той же окружности за счет двух согласованных прямолинейных перемещений (см. рис. 1, а), обеспечивается формообразующей системой, основанной на сообщении рабочему элементу вращательного движения (см. рис. 1, б).

Следует отметить целесообразность разработки в обоснованных случаях модулей, основанных на механизмах-построителях, например циклоидального типа, позволяющих формировать разные по форме траектории (производящие линии поверхностей) [9] более экономично по сравнению с ЧПУ, что может быть эффективно в условиях серийного и массового производства.

От пространственных характеристик рабочей зоны оборудования зависят форма и габариты заготовок, геометрические параметры получаемых при раскрое материала деталей – плоских из листового материала и профильных из труб, фасонного проката и т.п. Параметры рабочей зоны влияют также на структуру модульных систем для перемещения заготовки (рис. 2) и энергетического источника как составных элементов обрабатываемой системы. Указанные модульные системы основаны на перемещении энергетического источника над заготовкой и могут быть вращательного и поступательного типов.

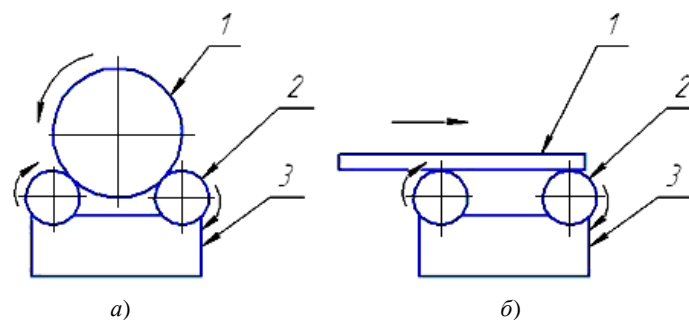


Рис. 2. Схемы модульных систем перемещения заготовки в виде трубы (а) и листа (б):
1 – обрабатываемая заготовка; 2 – транспортирующие элементы; 3 – силовая часть модуля

3. Синтез рациональных схем формообразования и анализ возможностей системы координатных перемещений по формированию траекторий исполнительного звена. Рассмотрим эту задачу на примере обработки энергетическим лучом фаски на плоской детали и сопряжения фасок между собой (рис. 3).

Кинематика формообразования поверхности энергетическим лучом аналогична обработке прямолинейной режущей кромкой, поскольку для создания образующей поверхности в обоих случаях не требуется исполнительное движение. При высокой энергоемкости рассматриваемого процесса линейное касание производящего элемента с номинальной поверхностью изделия обеспечивает минимальные затраты энергии. Перемещение прямой в пространстве в зависимости от формы направляющей линии, ее положения и вида движения (прямолинейное, вращательное, винтовое) позволяет формировать различные линейчатые поверхности, сочетания которых определяет геометрию обработанной поверхности – в виде плоскости, цилиндра, конуса, однополосного гиперboloида, геликоида и др.

Механика исполнительной системы станка базируется на кинематике реализуемых схем обработки.

Рассмотрим формообразование линейчатой поверхности в виде фаски на плоской заготовке. По геометрии можно выделить четыре группы фасок, ограниченных поверхностями – плоской, цилиндрической, конической или общего порядка, формообразование каждой из которых осуществляется определенной совокупностью движений. При формообразовании плоской фаски необходимы формообразующее движение $\Phi(P_1)$ и движение ориентации $Op(B_2)$, первое из которых обеспечивает перемещение образующей по прямолинейной направляющей, а второе служит для установки угла фаски. Фаска в виде цилиндрической поверхности формируется движениями $\Phi(P_1, P_2)$ и $Op(B_3)$. Сочетание прямолинейных движений P_1 и P_2 обеспечивает перемещение образующей по направляющей в виде плоской кривой, что определяет необходимость кинематической связи между ними. Движение $\Phi(P_1, P_2)$ может быть заменено движением $\Phi(B_1, B_2)$, образованным двумя согласованными вращательными движениями B_1 и B_2 .

Фаска, ограниченная конической поверхностью, формируется движением $\Phi(\Pi_1, B_3)$, при этом движение Π_1 служит для перемещения образующей по направляющей, а кинематически связанное с ним движение B_3 обеспечивает заданный угол α между образующей формируемой поверхности и поверхностью заготовки.

Для обработки фаски в виде поверхности общего порядка необходимо формообразующее движение $\Phi(\Pi_1, \Pi_2, B_3, B_4)$. Его элементарные движения Π_1 и Π_2 обеспечивают перемещение образующей по направляющей, вращательное движение B_3 – необходимый угол между образующей формируемой поверхности и поверхностью заготовки, а вращательное движение B_4 задает плоскость движения B_3 .

Кинематика формообразования определяется формой заготовки (плоская, круглая и т.п.), поверхностями, формирующими деталь, и геометрией сопряжения этих поверхностей. Например, две плоские фаски могут быть сопряжены по прямой, конической поверхности и плоскости (рис. 3). Каждое из этих сопряжений может быть получено различными сочетаниями исполнительных движений и последовательностью их выполнения, что необходимо учитывать при проектировании обрабатывающей системы станка.

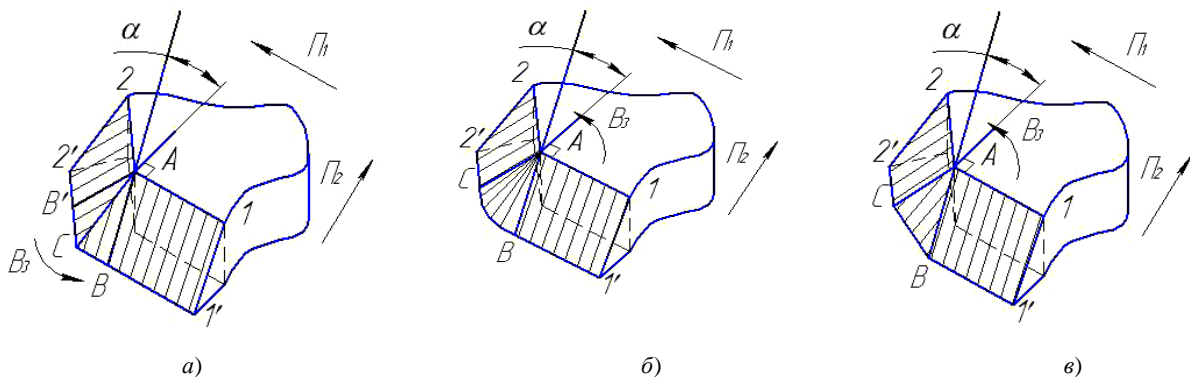


Рис. 3. Геометрия и кинематика формообразования сопряжения фасок по прямой (а), по конической поверхности (б), по плоскости (в)

Сопряжение двух фасок по прямой AC (рис. 3, а) возможно по различным схемам, из которых менее энергоемкой является следующая. Формируем поверхность фаски ($1'1AB$) до точки B , сообщив образующей AB движение $\Phi(\Pi_1, \Pi_2)$. Затем поворачиваем в плоскости $AB1'1$ движением $O_p(B_3)$ образующую AB (направление энергетического луча) относительно точки A до плоскости второй фаски $AC2'2$. Далее, поворачивая образующую AB относительно точки A в плоскости второй фаски (поверхность $AC2'2$) до положения AB' , формируем эту фаску. При этой схеме необходимо также вспомогательное вращательное движение $B_{cn}(B_4)$, определяющее плоскость движения ориентации.

Сопряжение тех же плоских фасок по конической поверхности ACB (рис. 3, б) обеспечивается поворотом (движением $\Phi(B_3)$) ее образующей вокруг точки A из положения AB в положение AC . Сопряжение двух плоских фасок по плоскости ABC (рис. 3, в) обеспечивается поворотом $\Phi(B_3)$ образующей AB вокруг точки A в плоскости ABC до плоскости второй фаски $AC2'2$. В данном случае необходимо вспомогательное вращательное движение $B_{cn}(B_4)$, определяющее плоскость вращательного движения $\Phi(B_3)$.

Сопряжение двух фасок по прямой AC (рис. 3, а) возможно по различным схемам, из которых менее энергоемкой является следующая. Формируем вначале поверхность фаски ($1'1AB$) до точки B , сообщив образующей AB движение $\Phi(\Pi_1, \Pi_2)$. Затем поворачиваем в плоскости $AB1'1$ движением $O_p(B_3)$ образующую AB (направление энергетического луча) относительно точки A до плоскости второй фаски $AC2'2$. Далее, поворачивая образующую AB относительно точки A в плоскости второй фаски (поверхность $AC2'2$) до положения AB' , формируем эту фаску. При этой схеме необходимо также вспомогательное вращательное движение $B_{cn}(B_4)$, определяющее плоскость движения ориентации.

Движение формообразования $\Phi(\Pi_1, \Pi_2)$ присуще всем станкам для раскроя металла с декартовой системой позиционирования. Для осуществления движений $\Phi(B_3)$, $B_{cn}(B_4)$ в исполнительную систему необходимо ввести дополнительный модуль, позволяющий изменять создаваемыми им движениями положение образующей (направление энергетического луча), в том числе с сохранением неподвижной точки ее поворота. Модуль может быть построен на базе различных механизмов традиционного, нетрадиционного (параллельной кинематики) или смешанного типов.

Рассмотрим кинематику дополнительного модуля, основанную на традиционной механике (рис. 4). В простейшем случае он должен сообщать образующей два вращательных движения в перпендикулярных плоскостях относительно точки A (рис. 4, а). Но данная кинематика не позволяет формировать поверхности общего порядка и обеспечивать сопряжение фасок по прямой и плоскости, с обеспечением условия энергоэкономии процесса резания. Для выполнения данного условия необходимо дополнить кинематику

модуля вращательным движением B_5 , осуществляющим поворот образующей в плоскости, перпендикулярной плоскости ее ориентации (рис. 4, б), или создать сложное движение формообразования $\Phi(B_3, B_4)$.

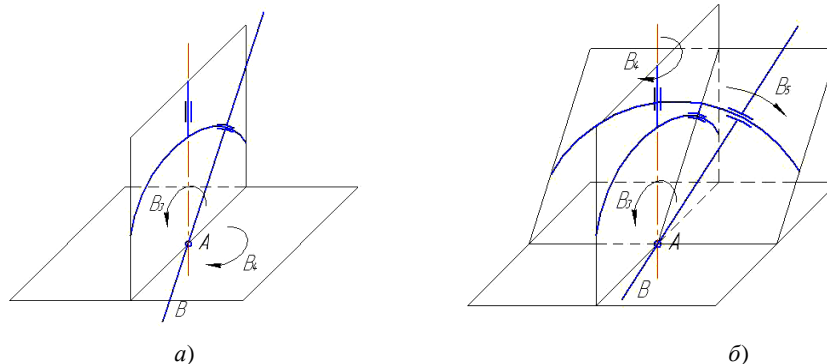


Рис. 4. Кинематика дополнительного модуля, создающего два (а) или три (б) элементарных движения

Построение модуля на базе механизма с параллельной кинематикой значительно упрощает структуру модуля и повышает его универсальность. Использование в качестве дополнительного модуля гексапода (механизма Стюарта) здесь не рационально, так как данный механизм имеет шесть степеней свободы, а исходя из геометрии и кинематики формообразования, для обеспечения оптимального положения энергетического луча по отношению к обрабатываемой заготовке достаточно не более трех степеней свободы. Этому условию отвечает трипод – механизм с тремя степенями свободы, осуществляющий два вращательных движения и одно поступательное. Благодаря этому он может обеспечить высокую точность позиционирования образующей (энергетического луча) и возможность ее поворота в любой плоскости из любого положения. Возможно применение и других механизмов. Автономность дополнительного модуля обеспечивает возможность модернизации существующих станков portalного типа.

4. *Разработка исполнительных модулей, осуществляющих передачу потоков информации и энергии.* Для нормальной работы оборудования необходимо обеспечить требуемые точность позиционирования и скорость перемещения исполнительных органов с учетом мощности воздействующего на заготовку энергетического потока, сохраняя во времени кинематические и энергетические параметры движения,

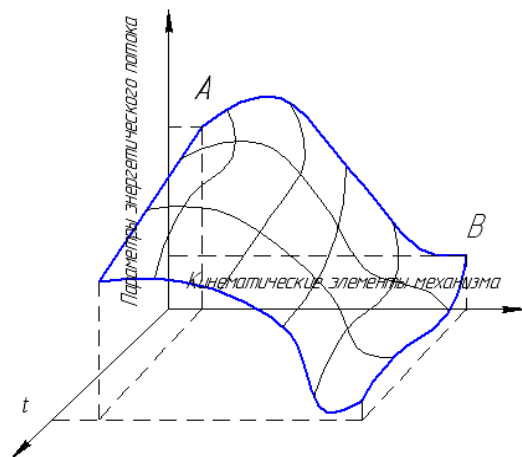


Рис. 5. Графическое представление изменения параметров энергетического потока

что достигается за счет соответствующей конструкции исполнительных механизмов. Следовательно, необходим комплексный подход к решению конструкторских задач. Например, применительно к высокоточным механизмам при анализе их конструкции и функционирования целесообразно рассматривать изменение энергетического потока с момента подачи к оборудованию до преобразования его в энергию движения с требуемыми характеристиками. Поступающая в исполнительную систему энергия проходит ряд состояний, характеризуемых мощностными и информационными параметрами. Прохождение энергетического потока через любое устройство связано с изменением этих параметров и графически может быть представлено траекторией точки, движущейся в n -мерном пространстве состояний от некоторого начального состояния A до конечного состояния B (рис. 5).

В каждый момент времени в любой кинематической паре механизма состояние энергетического потока характеризуется значениями его параметров.

Текущее состояние энергетического потока представляет результат его предшествующих изменений. Преобразование энергетического потока из состояния A в состояние B зависит от конструкции и свойств исполнительного механизма. Различным траекториям от A до B соответствуют определенные конструктивные исполнения данного механизма. Изменение поверхности отклика во времени определяется нестабильностью характеристик элементов механизма вследствие их изнашивания и других эксплуатационных факторов.

Таким образом, необходим комплексный подход к оценке свойств проектируемых механизмов, рассматривая их кинематические и конструктивные характеристики в совокупности, так как информационное и энергетическое преобразования осуществляются одновременно.

Рассмотрим эту задачу на примере анализа механизмов, обеспечивающих прямолинейное поступательное перемещение исполнительного органа (рис. 6). По кинематике и конструкции данные механизмы различны, но параметры создаваемых движений должны удовлетворять предъявляемым требованиям в отношении точности, быстродействия и др. Критерием, определяющим предпочтение того или иного исполнения механизма, является комплексная характеристика, определяемая назначением механизма и его свойствами.

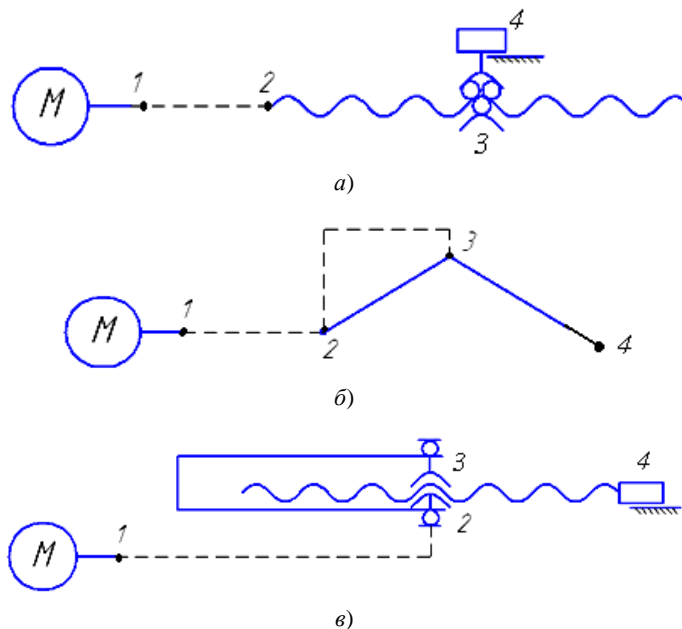


Рис. 6. Кинематические структуры исполнительных механизмов типа винт-гайка качения (а), волновой передачи винт – гайка (б) и рычажного механизма (в)

звена (0,1 – 0,0025 мм). Прямолинейность же траектории движения, как и в первом случае, определяется точностью исполнения направляющей.

Третий механизм (рис. 6, в) рычажного типа, его вращательные пары 2 и 3 соединены между собой кинематически внутренней связью 2 – 3 в соответствии с требуемой траекторией движения конечного элемента 4, что позволяет формировать этим механизмом различные траектории, включая и прямолинейную. Заметим, что в данном случае траектория движения формируется не конструктивно, как в первых двух случаях, а кинематически, что позволяет управлять ею для обеспечения требуемой точности, что принципиально невозможно в механизмах с винтовой передачей. Необходимая точность перемещения (позиционирования) достигается во всех рассмотренных схемах с помощью системы обратной связи.

Следует отметить преимущество применения третьего механизма при необходимости перемещения рабочего органа станка по криволинейной траектории. Если для получения криволинейного движения исполнительного элемента с модулями, в которых траектория движения определяется прямолинейными направляющими, необходимо два модуля, то модуль с внутренней связью решает данную задачу самостоятельно. Таким образом, при меньшей сложности он обладает теми же технологическими возможностями, что и два модуля с прямолинейными направляющими. Данное обстоятельство определяет преимущество модулей с внутренней кинематической связью.

Следует отметить, что использование в структуре оборудования модулей с механизмами, определяющими траекторию выходного звена кинематически, обеспечивает высокую надежность, ремонтпригодность, универсальность, а наличие элементов, позволяющих осуществлять точное дозирование энергетического потока, – и повышенную точность позиционирования.

Жесткость исполнительных механизмов обрабатывающей системы при их проектировании должна соответствовать заданной точности обработки. Эта задача решается известными методами, применяемыми, например, при проектировании металлорежущих станков.

5. *Анализ возможностей модулей по форме траекторий создаваемых движений.* Траектория создаваемого модулем движения и возможность управления ею устанавливаются на основе анализа математической модели схемы обработки. Например, схема обработки, основанная на двух вращательных движениях (см. рис. 1, б), и соответствующий ей модуль обеспечивают перемещение рабочего органа по гипотили эпициклоидальным кривым, основными формами которых в зависимости от направления враща-

Механизм (рис. 6, а) представляет собой передачу винт – гайка качения. Энергетический поток, передаваемый по кинематической цепи от двигателя ходовому винту и далее исполнительной винтовой паре, преобразуется, определяя силовую характеристику движения. Траектория движения исполнительного звена обеспечивается здесь конструктивно – формой конечного элемента, в данном случае прямолинейной направляющей и не зависит от характеристик движения ведущего звена (ходового винта). При этом непрямолинейность траектории не может быть меньше непрямолинейности направляющей. Повышенные требования к точности и долговечности тел качения, винта и гайки, направляющих, а также необходимость в надежной защите этих элементов обуславливают относительно высокую стоимость данного механизма.

Второй механизм (рис. 6, б) основан на волновой передаче винт – гайка. Наличие волнового элемента в его кинематике позволяет более точно дозировать энергетический поток, что обеспечивает высокую точность перемещения исполнительного

тельных движений и геометрических параметров схемы обработки могут быть прямая, окружность, эллипс и другие линии [9].

Заключение. В соответствии с изложенными основными этапами разработки оборудования модульного типа для раскроя материалов энергетическим лучом являются: выработка общей концепции проектирования; обоснование компоновки, типов и структуры модулей системы, их совместимости и относительной ориентации; синтез рациональных схем формообразования, системы координатных перемещений и анализ ее возможностей по формированию траекторий исполнительного движения; разработка исполнительных модулей с учетом передаваемых потоков информации и энергии. При этом методологической основой модульного построения технологического оборудования для раскроя материалов энергетическим лучом, решения соответствующих задач его функционального и компоновочного проектирования служат системная модель технологии формообразования и структура способа обработки. Использование данного подхода позволило предложить рациональную технологию формирования линейчатых поверхностей и их сопряжений применительно к обработке фасок на изделиях, получаемых при раскрое заготовок энергетическим лучом. Полученные результаты могут быть использованы как при проектировании нового, так и при модернизации существующего технологического оборудования.

ЛИТЕРАТУРА

1. Аверьянов, О.И. Модульный принцип построения станков с ЧПУ / О.И. Аверьянов. – М.: Машиностроение, 1978. – 208 с.
2. Данилов, В.А. Направления развития оборудования для плазменной и гидроабразивной резки / В.А. Данилов, Р.А. Киселев, В.С. Крутько // Инновационные технологии, автоматизация и мехатроника в машино- и приборостроении: материалы междунар. науч.-практ. конф. (Минск, 11 апр. 2012 г.); редкол.: Б.М. Хрусталеv (гл. ред.) [и др.]. – Минск: Бизнесофсет, 2012. – С. 41 – 42.
3. Автоматизированные комплексы плазменной резки / В.И. Бородавко [и др.] // Инновационные технологии, автоматизация и мехатроника в машино- и приборостроении: материалы междунар. науч.-практ. конф. (Минск, 11 апр. 2012 г.); редкол.: Б.М. Хрусталеv (гл. ред.) [и др.]. – Минск: Бизнесофсет, 2012. – С. 60 – 61.
4. Автоматизированный комплекс гидроабразивной резки / В.И. Бородавко [и др.] // Инновационные технологии, автоматизация и мехатроника в машино- и приборостроении: материалы междунар. науч.-практ. конф. (Минск, 11 апр. 2012 г.); редкол.: Б.М. Хрусталеv (гл. ред.) [и др.]. – Минск: Бизнесофсет, 2012. – С. 62 – 63.
5. Смирнов, А.И. Анализ перспектив развития методов формообразования в машиностроении / А.И. Смирнов. – М.: НИИмаш, 1982. – 49 с.
6. Данилов, В.А. Общие принципы синтеза рациональных технологий формообразования сложных поверхностей резанием / В.А. Данилов // Мир технологий. – 2003. – № 1. – С. 61 – 71.
7. Данилов, В.А. Синтез внутренних связей кинематических групп при проектировании металлорежущих станков / В.А. Данилов // Машиностроение: республ. межведомств. сб. науч. тр., Вып. 25. – Минск: БНТУ, 2010. – С. 312 – 318.
8. Врагов, Ю.Д. Анализ компоновок металлорежущих станков / Ю.Д. Врагов. – М.: Машиностроение, 1978. – 208 с.
9. Данилов, В.А. Кинематическое формирование производящих линий поверхности при обработке резанием на базе циклоидальных кривых / В.А. Данилов, Л.А. Данилова // Вестн. Полоц. гос. ун-та. Серия В. Прикладные науки. – 2004. – № 12. – С. 44 – 53.

Поступила 25.06.2012

FEATURES OF BUILDING SYSTEMS PROCESS EQUIPMENT SHAPE MODULAR TYPE MATERIAL CUTTING ENERGY BEAM

V. DANILOV, R. KISELYOV, V. KRUTKO

The tasks of the functional layout and design of process equipment module type for cutting materials with concentrated energy sources, taking into account the directions of its development, the ongoing shaping of technology are considered. The characteristics of the main stages of development of such equipment, the principles of consistency and continuity of technical solutions in a modular design are given. On the basis of the technology shaping system model and the structure of the processing method, tasks of typification and formation of equipment units, synthesis of rational schemes of forming by beam energy of ruled surfaces and their conjugation with each other, ways of realization of schemes of forming by respective modules when creating new and upgrading the existing engineering equipment are observed.

УДК 621.91.01/02

**АНАЛИЗ ТЕНДЕНЦИЙ ПРОЕКТИРОВАНИЯ ИНСТРУМЕНТАЛЬНЫХ СИСТЕМ
ЧАСТЬ 2. МЕХАНИЗМЫ КРЕПЛЕНИЯ МОДУЛЕЙ*****д-р техн. наук, проф. Н.Н. ПОПОК
(Полоцкий государственный университет)**

Сформулированы основные проблемы конструирования и производства режущих инструментов на отечественных машиностроительных предприятиях. Рассмотрены эквиваленты терминов обработки резанием и обозначений материалов, проведен анализ типов режущих пластин, резовых блоков и их крепления в инструментальных модулях. Выделены конструктивные особенности инструментальных систем, в том числе для многоцелевой обработки. Даны примеры систем для обтачивания, отрезания, фрезерования, растачивания, выявлены общие тенденции современного развития инструментального обеспечения машиностроительных предприятий.

Создавая первые модульные инструменты типа «Block Tool System» (BTS) [35], фирма Sandvik, решала следующие задачи: сменная режущая вставка должна обладать такой же жесткостью, как и цельный инструмент; режущая вставка должна автоматически перемещаться по прямой линии вперед и назад относительно базового элемента хвостовика для облегчения автоматизации настройки; модульный инструмент должен обеспечивать заданную точность при повторной установке режущей вставки. Кроме того, Фирма Sandvik разработала зажимные устройства, пригодные для работы в ручном и автоматическом режиме и обеспечивающие усилие зажима от 15 до 60 кН в зависимости от размеров модульного инструмента. К достоинствам этого зажимного устройства относятся короткий рабочий ход и незначительный момент затяжки при ручном закреплении инструмента. Например, модульный инструмент BT 40, закрепляемый с усилием 38 кН, работает при глубине резания 15 мм и подаче 1,5 мм/об. При смене режущей вставки точность установки составляет $\pm 0,002$ мм в осевом направлении и $\pm 0,005$ мм в радиальном.

Универсальность модульных инструментов обеспечивается при одинаковой системе базирования инструментов на токарных и многоцелевых станках. Система «Komet ABS», разработанная фирмой Hahn & Kolb для фрезерования, усовершенствована в целях применения на токарном станке и выпускается под торговой маркой SBA. Эта система обладает такой же прочностью и жесткостью, как и система ABS (табл. 6, п. 1). Точность позиционирования составляет $\pm 0,002$ мм. Инструмент базируется и закрепляется с помощью винтового захвата за призматические базовые элементы на наружном диаметре. Время смены инструмента составляет около 8 с [35].

В развитие этих конструкций фирма Sandvik Coromant (Швеция) [36] разработала систему модульного инструмента «Varilock» (табл. 6, п. 2), аналогичную системе фирмы Kelch (табл. 6, п. 14). Отличие заключается в том, что для обеспечения лучшей собираемости модулей на наружной цилиндрической поверхности предусмотрены две ступени. Первая ступень на 0,3 мм ниже по высоте второй ступени, что облегчает правильное центрирование в процессе сборки.

Фирма Sandvik Coromant также разработала систему «Coromant-Capto», основную на РК-профильном соединении (табл. 6, п. 3), характеризующемся большой несущей способностью и равномерным распределением деформаций. В этой системе коническое соединение с уклоном $1^{\circ}15'$ и тремя дугowymi поверхностями контакта обеспечивает самоцентрирование и имеет одинаковую жесткость в обоих направлениях вращения. Форма, длина и плоскости контакта соединения обуславливают жесткость, необходимую для токарной обработки в широком диапазоне режимов резания, для фрезерования длинными концевыми фрезами и для сверления с большими подачами. Резцовая головка 1 посредством тяги 4 втягивается в державку 2. При этом разжимная втулка 3 входит во внутреннюю канавку в отверстии головки 1. Усилие втягивания подобрано таким образом, что торцовая поверхность головки 1 плотно прижимается к торцу Б державки. При раскреплении головки 1 тяга 4 своим специальным буртиком толкает головку, преодолевая силу трения. Предусмотрено использование разнообразных головок с хвостовиками системы «Coromant-Capto» на токарных станках, в том числе с вращающимся инструментом, на фрезерных станках и на обрабатывающих центрах.



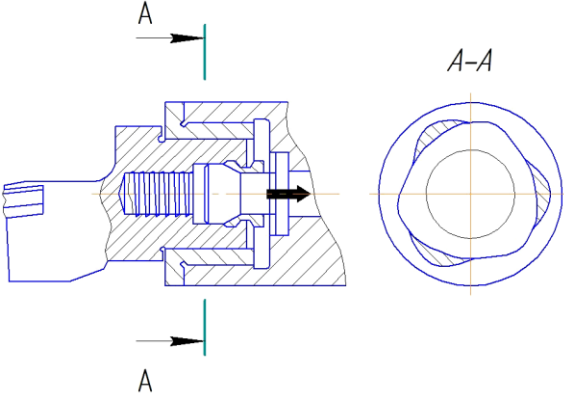
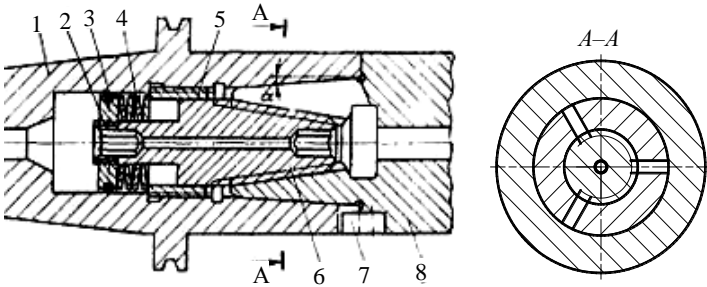
Универсальная блочно-модульная технологическая инструментальная система «ВИНТ-ТИС» включает (табл. 3, п. 4): 1 – модуль 1; 2 – фланец; 3 – кольцо; 4 – пружины тарельчатые; 5 – втулку; 6 – тело коническое; 7 – шпонку; 8 – модуль 2 [37]. В этой системе соединение модулей 1 и 8 происходит при базировании по конической и торцовой поверхностям. Однако с целью создания наиболее оптимальных условий для прилегания конических поверхностей модулей друг к другу наружный конус имеет отвер-

* Часть 1 статьи опубликована в журнале «Вестник Полоцкого государственного университета. Серия В. Промышленность. Прикладные науки». – 2012. – № 3. – С. 71 – 81. Нумерация таблиц, рисунков и литературных источников сквозная.

стие и три радиальных разреза, что обеспечивает его деформирование при осевой затяжке. Внутри конуса ввинчивается коническое тело 6, которое дополнительно деформирует основной конус, образуя беззазорное соединение модулей. Тарельчатые пружины 4 и детали 2, 3 и 5 создают осевую силу затяжки при завинчивании конического тела 6. Крутящий момент передается посредством шпонки 7. Данная конструкция является одной из наиболее совершенных с точки зрения обеспечения жесткости соединения модулей, однако в технологическом отношении она сложная.

Таблица 6

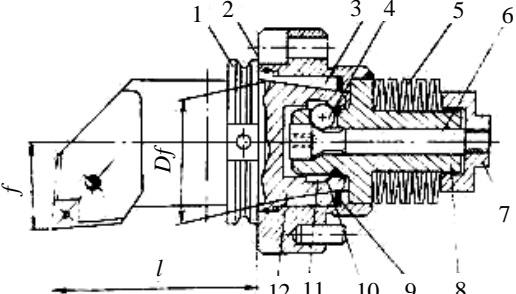
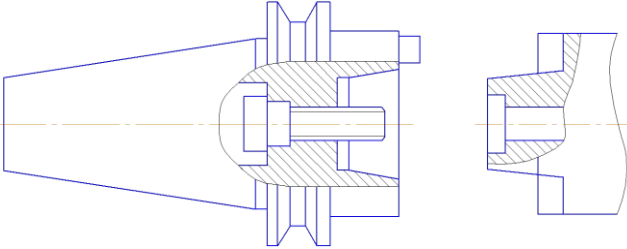
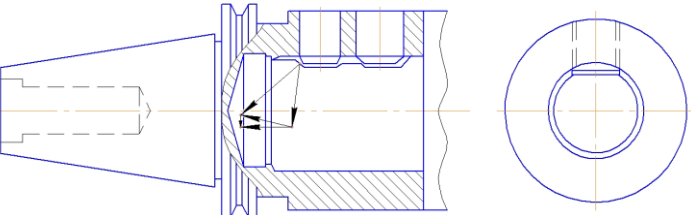
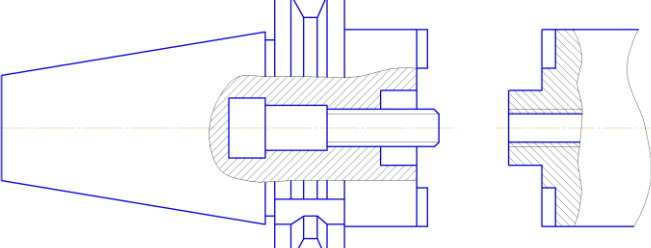
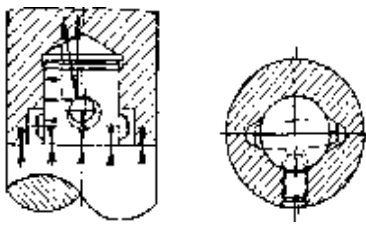
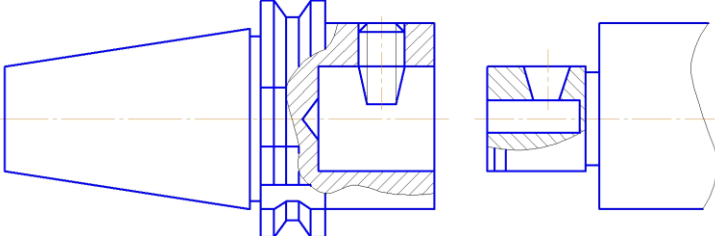
Анализ модульных инструментальных систем зарубежных фирм

№ п/п	Схема и внешний вид инструментальной системы	Наименование системы и фирмы
1	2	3
1		Инструментальная система ABC фирмы «Kommet» (США)
2		Система модульного инструмента «Varilock» фирмы «Sandvik Coromant» (Швеция)
3		Инструментальная система «Coromant-Carto» фирмы «Sandvik Coromant» (Швеция)
4		Инструментальная система «Jartim-Flex» («ВИНТ-ТИС») внедренческого научно-производственного предприятия «Винт» (Россия)

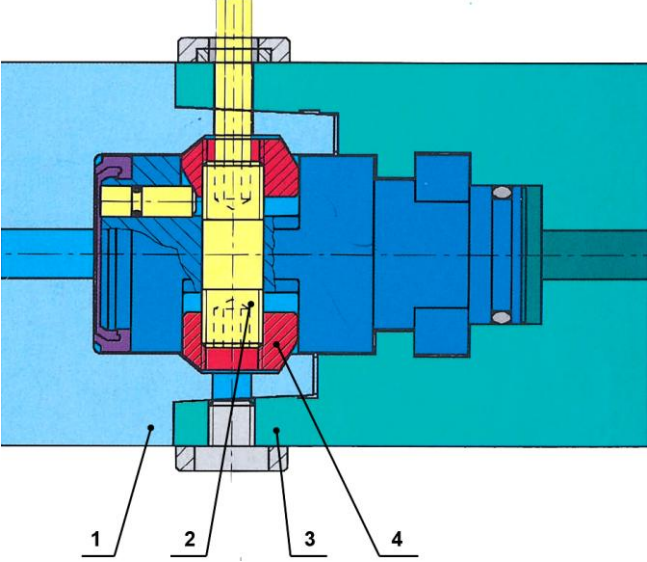

Продолжение таблицы 6

1	2	3
5		<p>Инструментальная модульная система «МС» фирмы Hertel (Германия)</p>
6		<p>Инструментальная модульная система «RC» фирмы Hertel (Германия)</p>
7		<p>Инструментальная система «Multiflex (MTX)» фирмы Widia Krupp (Германия)</p>
8		<p>Блочная система «Widaflex» фирмы Krupp Widia (Германия)</p>
9		<p>Инструментальная система осевого инструмента фирмы Krupp Widia (Германия)</p>
10		<p>Инструментальная система фирм СО (Швейцария) и Вакуер (Италия)</p>

Продолжение таблицы 6

1	2	3
11		Инструментальная система «KV» фирмы Kennametal (США)
12		Система инструмента для станков с ЧПУ «Novex NC» фирмы Walter (Германия)
13		Инструментальная модульная система «Unidorn Spannsystem» фирмы «Dornag» (Швейцария)
14		Модульная система расточного инструмента фирмы Kelch (Германия)
15		Система модульного инструмента «СКВ» фирмы Heinz Kaiser (Германия)
16		Модульные расточные инструменты фирм Wohlhaupter и Kaiser (Германия)

Окончание таблицы 6

17		Система «HSK» фирмы «Mitsubishi» (Япония)
18	 <p>HSK-DIN 69893 DIN69871 MAS 403 BT DIN 2080</p>	Стандартные крепления модулей фирмы «Iscar»

Для соединения одновременно по цилиндрической поверхности и торцу фирма Hertel разработала систему «МС» (табл. 6, п. 5, а) с самокомпенсирующимся зажимным и блокирующим механизмом [38]. Цилиндрический хвостовик диаметром 28h3 инструмента 1 имеет радиальное отверстие диаметром 11H7 и размещается в отверстии диаметром 28H3 державки 4. В отверстии хвостовика расположен сухарь 5 с двумя симметричными скосами, в которые упираются самоустанавливающиеся шарики 3. Симметричность срезов шариков относительно оси вращения регулируется винтом 6. При завинчивании винта 2 происходит затягивание хвостовика инструмента 1 в державку 4 до создания торцевого натяга.

Однако при соединении по цилиндрической поверхности качества точности IT3 практически невозможна автоматическая смена инструмента. Поэтому для этого случая фирма Hertel модифицировала систему «МС» и заменила плоский торец на самоцентрирующееся торцевое зубчатое зацепление Хирта, что позволило снизить требования к точности соединения (табл. 6, п. 5, б). В модифицированной системе «МСН50» инструмент 1 имеет отверстие, в которое завинчиваются регулировочные винты 2 и 6 с самоустанавливающимися шариками 7. Державка 4 имеет цилиндрическую цапфу с установленным в нем сухарем 5. На сопрягаемых торцах инструмента 1 и державки 4 выполнены зубчатые полумуфты 3 зацепления Хирта. При внецентренном нагружении, что характерно для точения, жесткость торцевого зубчатого зацепления в 1,5...2 раза выше жесткости обычного соединения с плоским торцом. Система «МСН50» была разработана специально для токарных станков с главным приводом в револьверной головке и может применяться для неподвижных и вращающихся инструментов.

Фирма Hertel также использует систему «RS» (табл. 6, п. 6), так называемый кольцевой сегментный зажим. В шпинделе 1 имеется кольцевая расточка, в которую вставляется трубчатый хвостовик инструмента 2. С внутренней кольцевой канавкой хвостовика взаимодействуют сегменты 4, количество которых определяется размерами соединения. Сегменты 4 деформируются под действием радиальной силы со стороны шариков 3, которые в свою очередь выталкиваются тягой 5. Торцевое замыкание может быть осуществлено по плоскому торцу или по торцевому зубчатому зацеплению Хирта. Канавки под захват автооператора и размеры захватной части тяги стандартные и позволяют использовать имеющиеся узлы станков. Стандартным является также способ подвода СОЖ (DIN 69871, форма В).

В системе инструментальной оснастки Multiflex (MTX) фирмы Krupp Widia (Германия) (табл. 6, п. 7) базирование резцовых головок осуществляется по цилиндрической поверхности и торцу [39]. Резцовая головка 1 цилиндрической формы имеет соосное с корпусом посадочное отверстие 2. Пальцы 3 при перемещении тяги 6 упираются в коническую поверхность канавки 5 и поджимают головку к базовому торцу. Для фиксирования резцовой головки служит торцовая шпонка 4. Цилиндрическая базовая поверхность блока имеет переднюю часть меньшего диаметра для облегчения установки резцовых головок. Резцовые головки в системах MTX имеют симметричную форму, режущая кромка расположена на оси симметрии для головок, предназначенных как для наружной, так и для внутренней обработки. Поэтому для их закрепления возможно использование унифицированного блока. На наружной цилиндрической поверхности головок нанесены V-образные канавки с углом 60° под захваты для автоматической замены головок. Резцовые головки имеют внутренний подвод СОЖ, совмещенный с системой закрепления.

Фирма Krupp Widia также предложила конструкцию блочной системы «Widaflex» (табл. 6, п. 8), в которой используются узлы крепления, наиболее подходящие не только для токарного инструмента, но и для вращающегося инструмента типа сверл, фрез и метчиков. В качестве базового элемента выбран конус (конусность 1:5). Резцовая головка 2 имеет канавку 3 для захвата грейфером устройства автоматической смены инструмента. После размещения конуса 1 резцовой головки 2 в коническом отверстии блока 8 по программе включается вращение гайки 7, в результате чего происходит ввинчивание резьбового конца тяги 6. Тяга, перемещаясь, своими скосами выталкивает из обоймы 5 шарики 9, которые входят в наклонные отверстия конуса 1. При закреплении упругая часть конуса деформируется, одновременно конус перемещается в коническом отверстии блока 8 до замыкания по торцу 4 с силой 2,5 кН. При этом обеспечивается точное крепление в осевом и радиальном направлениях (точность позиционирования $\pm 0,005$ мм). По данным фирмы Krupp Widia, использование такой универсальной системы, позволяет на 25 % сократить число применяемого в ГПС инструмента. Фирма Krupp Widia (Германия) разработала узел соединения модулей осевого инструмента, в котором использован принцип базирования по конусу, как в системе, показанной в пункте 10, таблицы 3 (см. Ч. 1). Однако конструкция механизма осевого стягивания в этом узле существенно изменена. В качестве базировочного элемента принят укороченный конус (впервые был предложен американской фирмой Kennametal). Базовый конус выполнен эластичным с двумя или четырьмя базовыми открытыми наклонными поверхностями, в которые входят специальные шарики, размещенные в обойме. Под воздействием конуса, выполненного на зажимном винте, шарики перемещаются в радиальном направлении и, контактируя со скосами в отверстиях конуса, создают осевую силу, которая затягивает модуль в отверстие модуля до плотного прилегания по торцам. В данной системе инструментов предусмотрен полный набор переходных модулей и удлинителей, позволяющий практически закрепить почти все виды режущего инструмента, необходимого для обработки большинства деталей на станках с ЧПУ всех типов.

Базирование по цилиндрической поверхности и плоскому торцу путем непосредственного свинчивания модулей использовано в инструментальных системах фирм СО (Швейцария) и Вакует (Италия) [40]. В этом соединении (табл. 6, п. 10) осевое стягивание и передача крутящего момента осуществляются посредством резьбы, имеющейся на каждом модуле. Резьба выполнена с зазором. Цилиндрическая наружная поверхность выполняется с допуском по g5, а внутренняя сопрягаемая поверхность с допуском по Н6. Длины сопрягаемых цилиндрических поверхностей достаточно большие, что обеспечивает хорошее центрирование модулей. Конструкция данного соединения модулей является одной из наиболее простых как в изготовлении, так и в эксплуатации. Непосредственное свинчивание собираемых модулей и жесткое прилегание торцов обуславливают высокую жесткость инструмента. К недостаткам соединения следует отнести то, что оно не обеспечивает ориентации режущих кромок, что необходимо при растачивании. Для устранения данного недостатка используют специальные державки, имеющие дополнительные резьбовые кольца, с помощью которых регулируют положение переднего торца, контактирующего с собираемым модулем. Как показал опыт эксплуатации данного соединения, при значительных нагрузках могут возникнуть трудности с отвинчиванием резьбы. Для устранения этого рекомендуется применение графитосодержащей смазки.

В системе KV (табл. 6, п. 11) инструментальной оснастки фирмы Kennametal (США) базовой поверхностью резцовых головок является укороченный конус 7:24 [41]. Внутри конуса 12 выполнена полость 11 с конической поверхностью 8. Стержень 10 с шариками 4 входит в полость 11. При смещении назад тяги 6 шарики 4, упираясь в коническую поверхность, затягивает конус 7:24 и подвижную в осевом направлении втулку 3 до тех пор, пока фланец 1 резцовой головки не достигнет плоскости 2. При смещении втулки 3 сжимается резиновое кольцо 9, которое при обратном ходе тяги 6 возвращает втулку 3 в первоначальное положение. Контакт по конической поверхности и по торцу одновременно обеспечивает

высокую жесткость закрепления резовых головок. Базовые поверхности защищены от попадания стружки. Система имеет четыре исполнения с четырьмя размерами конуса 7:24. При повторных установках одной и той же резовых головок обеспечивается точность $\pm 0,003$ мм в осевом и $\pm 0,005$ мм в радиальном направлении, при смене различных головок точность установки составляет $\pm 0,38$ мм.

Система инструмента для станков с ЧПУ «Novex NC» фирмы Walter (Германия) состоит из сверл с СМП и концевых фрез большого диаметра, выполненных с коническими (конус 7:24) хвостовиками, оправок с коническими (конус 7:24) хвостовиками для насадных фрез, патронов для концевых фрез и сверл с цилиндрическими хвостовиками, а также втулок для инструмента с конусами Морзе [42]. Часть системы построена (табл. 6, п. 13) на основе узла крепления, в котором элементы соединяются посредством точного короткого конуса, допуски на размеры которого выдерживаются таким образом, чтобы при сборке достичь сопряжения по торцовым поверхностям. Крутящий момент передается через шпоночное соединение по торцу, что позволяет ориентировать режущую кромку расточного инструмента относительно шпинделя.

Фирма Domag (Швейцария) использует инструментальную модульную систему «Unidorn Spannsystem» (табл. 6, п. 13), в которой модули базируются по цилиндрической поверхности и торцу [43]. Цилиндрические хвостовики 2 имеют лыски, которые взаимодействуют с радиально расположенными в отверстии сопрягаемого модуля 3 винтами 1. Для создания осевого натяга на одной из лысок выполнен скос, в который упирается винт, создающий осевую силу затяжки. Инструментальный комбинат Schmalcalden (Германия) использует подобную систему инструмента.

В конструкции модульной системы расточного инструмента фирмы Kelch (Германия) [44] базирующим элементом является цилиндр (табл. 6, п. 14). Затяжка элементов системы осуществляется осевым винтом. В качестве базового элемента, закрепляемого в шпинделе станка, используется конус 7:24 разного исполнения с цилиндрическими регулируемые по длине хвостовиками (диаметром 28, 36 и 48 мм) с трапецеидальной резьбой. Выпускаются также переходники и удлинители, обеспечивающие необходимую длину инструмента. Расточные дву- и однозубые головки имеют те же базирующие поверхности, что и вспомогательный инструмент типа сверлильных и цанговых патронов, переходных втулок с конусом Морзе и оправок для насадного инструмента. Система включает приспособления для сборки инструмента из стандартных элементов.

Сочленение модулей модульного прецизионного инструмента системы СКВ фирмы Heinz Kaiser (Германия) (табл. 6, п. 15) осуществляется по торцу и отверстию, в которое входит цилиндрический хвостовик сопряженного модуля. Крутящий момент передается штифтом, установленным в хвостовике. Штифт контактирует с поверхностью карманов, выполненных в отверстии. Модуль закреплен винтом с конусным концом. При этом хвостовик прижимается к поверхности отверстия и одновременно торцом к торцу сопрягаемого модуля [45]. Такое сочленение обеспечивает максимальную жесткость, передачу максимального крутящего момента, точное взаимное расположение модулей (радиальное биение не более 0,002 мм), передачу крутящего момента при вращении шпинделя как по часовой стрелке, так и против неё.

Сравнительно широко применяются модульные расточные инструменты фирм Wohlhaupter (Германия) и Kaiser (табл. 6, п. 16), в которых метод соединения модулей основан также на базировании по цилиндрической поверхности и торцу, но осевое усилие затяжки и передача крутящего момента осуществляются посредством радиально расположенных затяжных винтов. При завинчивании винтов их коническая поверхность контактирует со скошенной поверхностью отверстия в другом модуле, в результате чего создается осевое усилие. Для повышения жесткости на кручение дополнительно установлены два штифта, расположенных в диаметральной плоскости.

Японская фирма «Mitsubishi» предлагает систему крепления HSK (табл. 6, п. 17), где 1 – конический хвостовик (инструмент), 2 – крепежный винт, 3 – коническое отверстие (шпиндель), 4 – прихват [46]. Система применяется при высокоскоростной обработке. Если при установке наблюдается небольшой зазор, благодаря центробежной силе, конус инструмента входит в полный контакт с конусом оправки в последствие эластичной деформации. В результате прилегание осуществляется по двум плоскостям. Обеспечивается гарантированная точность повторной установки, высокая жесткость в радиальном и осевом направлении благодаря прилеганию по двум плоскостям. Съемная конструкция обеспечивает легкую замену инструмента, даже если он подвергся температурной деформации. Также обеспечивается центральный и угловой тип подачи СОЖ.

Израильская фирма Iscar [47] использует стандартные системы крепления модулей по HSK DIN 69893, DIN 6987, MAS 403 BT, DIN 2080 (табл. 6, п. 18).

При креплении модулей в инструменте многие фирмы используют соединения типа «ласточкин хвост», Т-образные и другие пазы. При этом предусматривается в конструкциях возможность регулировки положения модулей и режущей пластины. Примеры таких конструкций представлены на рисунках 4 – 6 [21; 22; 25].

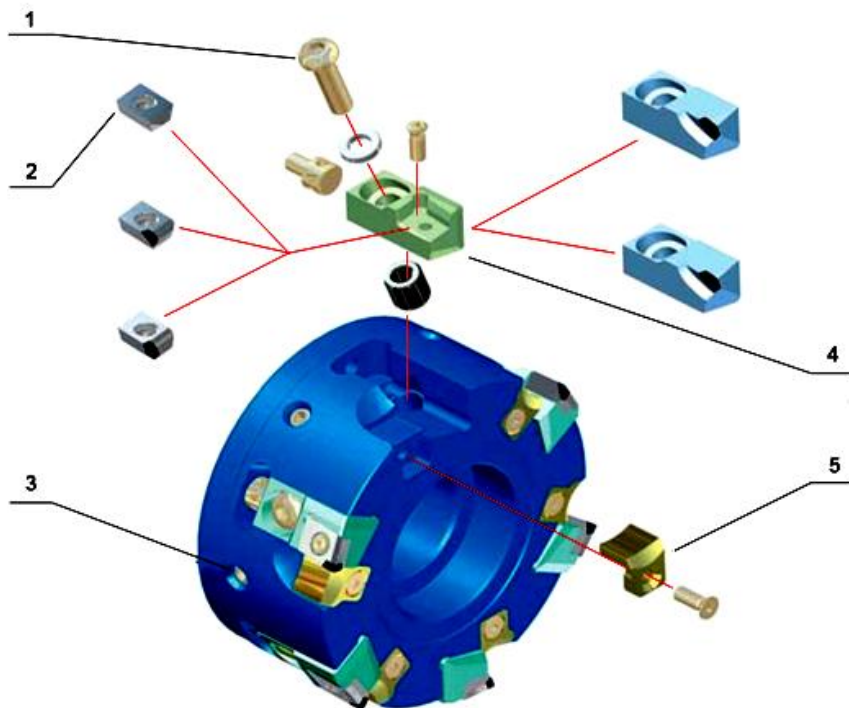


Рис. 4. Крепление картриджей к корпусу фрезы фирмы «Sandvik Coromant»: 1 – винт крепежный; 2 – пластина режущая; 3 – винт балансирующий; 4 – картридж; 5 – пластина стружконаправляющая

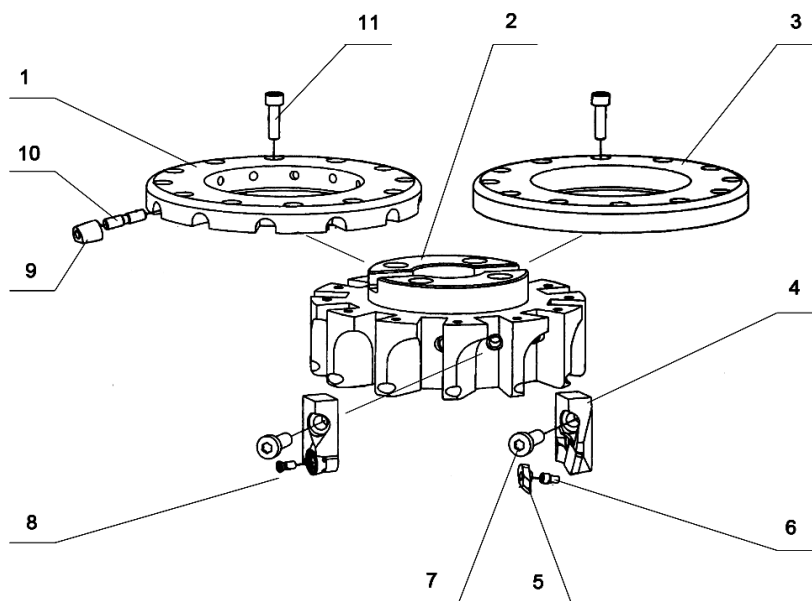


Рис. 5. Технологическая схема сборки фрезы фирмы ОАО «Специнструмент»: 1 – регулирующее фиксирующее кольцо; 2 – корпус фрезы; 3 – не регулирующее фиксирующее кольцо; 4 – картридж; 5 – Г-образный прихват; 6 – винт крепления Г-образного прихвата; 7 – винт крепления пластины; 8 – винт крепления прихвата; 9 – регулятор картриджа; 10 – винт регулятора картриджа; 11 – винт для крепления кольца

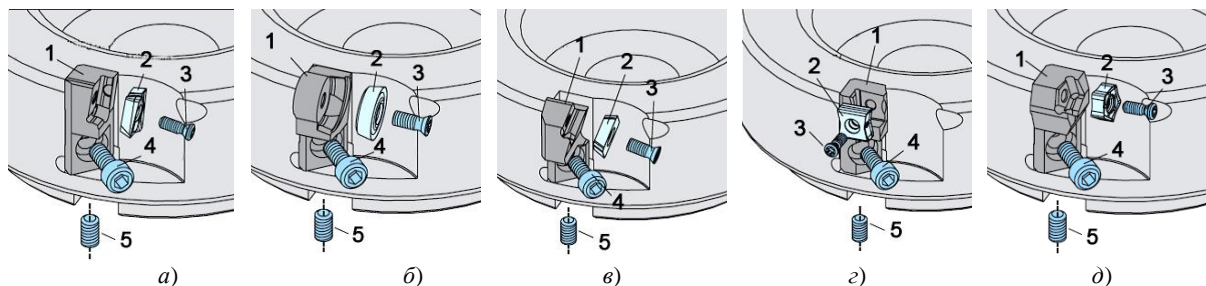


Рис. 6. Картриджи для фрез фирмы «Ingersol» с пластинами режущими APCT1604 (а), RPL 1905 (б), SHE 1504 (в), NCE (г), PNCU 0805 (д):

1 – корпус картриджа; 2 – пластина режущая; 3 – винт для крепления пластины;
4 – винт для крепления корпуса картриджа; 5 – винт регулировочный

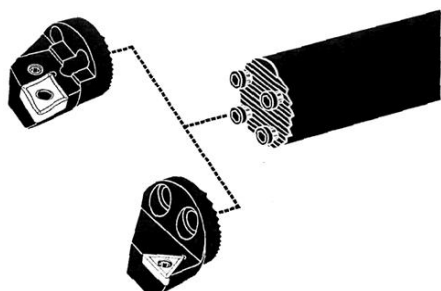


Рис. 7. Схема установки и закрепления резцовых модулей посредством болтов и рифлений фирмы «Sandvik Coromant»

Расточные оправки 570-3 с устройством виброгашения сконструированы для работы со сменными резцовыми модулями T-MAX U и T-MAX P [21]. Установка и жёсткое закрепление резцового модуля на оправке осуществляется посредством болтов и монтажных рифлений (рис. 7). Характерные особенности:

- увеличенные вылеты;
- повышенная производительность;
- улучшенное качество обработанной поверхности;
- уменьшенный износ режущей пластины;
- уменьшенный износ станка;
- пониженный уровень шумов.

Окончание статьи в следующем номере журнала «Вестник Полоцкого государственного университета. Серия В. Промышленность. Прикладные науки». 2013. № 3.

ЛИТЕРАТУРА

35. Modular systems – a new standard // Machinery and production engineering. – 1987. – № 3725. – P. 31 – 350. (Экспресс-информация, Серия 5. Средства технологического оснащения металлообрабатывающего инструмента. – 1988. – Вып. 12. – С. 9 – 11).
36. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.Coromant.Sandvik.com>.
37. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.vint.ru>.
38. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.hertel.com>.
39. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.widia.com>.
40. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.mtools.narod.ru>.
41. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.widia.com/en/kennametal>.
42. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.walter.com>.
43. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.dornag.com>.
44. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.kelch.com>.
45. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.kaiser.com>.
46. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.mitsubishi.com>.
47. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.iscar.com>.

Поступила 18.01.2012

TREND ANALYSIS OF ENGINEERING OF DEVELOPMENT SYSTEMS Part 2. MODULE SUPPORT MECHANISMS

N. POPOK

Key problems of engineering and production of cutting tools at domestic machine-building enterprises are formulated. Equivalent terms for cutting work and material designation are considered. Analysis of cutter blade and cutter block types and their holding in instrumental modules is carried out, constructional features of development systems, including ones for multipurpose treatment are singled out. Examples of systems for turning, parting, milling, boring are given, general trends in modern development of instrument provision of machine-building enterprises are disclosed.

УДК 621.81.004.67

МОДУЛЬНЫЕ ПРОЦЕССЫ ВОССТАНОВЛЕНИЯ ДЕТАЛЕЙ В РЕМОНТНОМ ПРОИЗВОДСТВЕ

канд. техн. наук, доц. А.П. КАСТРЮК, д-р техн. наук, проф. В.П. ИВАНОВ
(Полоцкий государственный университет)

Определены конструкторские и технологические модули восстанавливаемых деталей на основании классификации их элементов. Приведено содержание технологических модулей, обеспечивающих восстановление геометрических параметров и эксплуатационных свойств конструктивных элементов деталей. Показан состав технологического процесса восстановления детали из технологических модулей и обоснована эффективность предложенной концепции.

Введение. Повышение мобильности и эффективности ремонтного производства с обеспечением нормативного качества продукции требует разработки новых форм его организации. Мобильность производства предполагает освоение ремонта машин и агрегатов новых видов в кратчайшее время за счет уменьшения объема подготовки производства (в том числе количества создаваемых средств технологического оснащения). Эффективность производства связана с уменьшением расхода производственных ресурсов в основном при восстановлении деталей. Нормативное качество ремонта машин обусловлено обеспечением в заданных пределах всех показателей технической документации.

При рассмотрении применяемых классификаций частей машин видно, что последние структурные элементы в них – это детали. Соответственно этим классификациям в машиностроении действуют процессы изготовления деталей: единичные, типовые и групповые. Учитывая специфику ремонта машин, дополнительно применяют подефектные и маршрутные процессы восстановления деталей [1; 2]. Заводы и участки, выпускающие многономенклатурную продукцию, не могут готовить производство для восстановления деталей каждого наименования по единичным технологическим процессам. Техническое противоречие может быть разрешено использованием модульных процессов и, соответственно, средств технологического оснащения модульного строения.

Цель данной работы состоит в повышении эффективности ремонтного производства за счет разработки и применения модульных процессов восстановления деталей.

Основная часть. В ранее представленной нами работе [3] предложена многомерная система отношений между деталями, их элементами и процессами восстановления этих элементов с выделением конструкторских и технологических модулей.

Конструкторский модуль детали – многократно повторяющийся элемент различных деталей (сходной формы, но с изменяющимися размерами), выполняющий одну и ту же элементарную служебную функцию. Анализ деталей ремонтного фонда показал, что при переходе от детали к детали конструктивные элементы повторяются: число восстанавливаемых конструктивных элементов деталей существенно меньше множества самих деталей. Например, при значительном разнообразии корпусных деталей они содержат такие конструкторские модули: стенки, стыки, направляющие элементы (плоские или цилиндрические), отверстия под подшипники и резьбовые отверстия. Каждому виду элементов деталей характерны свои условия работы, природа повреждений и восстанавливаемые свойства. Рассматривают такое число конструкторских модулей, чтобы из них можно было составить любую деталь машины (агрегата).

Восстанавливаемые детали $D^{(1)}, D^{(2)}, \dots, D^{(i)}, \dots, D^{(n)}$ (где $i = 1, \dots, n$) ремонтируемого агрегата включены в качестве элементов в левый столбец матрицы вида:

$$\begin{bmatrix} D^{(1)} \\ D^{(2)} \\ \dots \\ D^{(i)} \\ \dots \\ D^{(n)} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} K_1^{(1)} & K_2^{(1)} & \dots & K_j^{(1)} & \dots & K_m^{(1)} \\ K_1^{(2)} & K_2^{(2)} & \dots & K_j^{(2)} & \dots & K_m^{(2)} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ K_1^{(i)} & K_2^{(i)} & \dots & K_j^{(i)} & \dots & K_m^{(i)} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ K_1^{(n)} & K_2^{(n)} & \dots & K_j^{(n)} & \dots & K_m^{(n)} \end{bmatrix}$$

Каждая деталь включает конструкторские модули $K_j^{(i)}$ (элементы столбцов правой матрицы), число которых достигает m . Рассматривают только те конструкторские модули, которые имеют повреждения и подлежат восстановлению. Техническое состояние конструкторских модулей характеризуется геометрическими параметрами и эксплуатационными свойствами (таблица), при этом параметры и свойства обеспечиваются не во всем объеме деталей, а в некоторых их элементах.

Геометрические параметры и эксплуатационные свойства
восстанавливаемых деталей и способы их обеспечения

Параметры, свойства		Способы обеспечения
наименование	размерность	
Линейный размер	мм	Выбором металлорежущего оборудования на основе согласования допуска на размер детали с ценой деления лимба или точностью позиционирования дискретной системы ЧПУ
Угловой размер	градус угловой	
Форма элементов детали	мм	Ориентированием (базированием) заготовки относительно главного движения. Прямолинейностью направляющих станка. Жесткостью и точностью оборудования, выбором инструмента и режимов обработки
Взаимное расположение поверхностей	мм, градус; мм/мм	Ориентированием (базированием) заготовки относительно движения подачи. Правкой заготовки
Шероховатость поверхностей	$Ra; Rz$	Выбором инструмента, вида и режима обработки
Вид кривой опорной поверхности	v, b – параметры степенной аппроксимации опорной кривой	Приработкой трущихся поверхностей
Износостойкость трущихся поверхностей	мкм/ч, мкм/1000 км	Необходимым химическим, структурным и фазовым составом материала трущегося поверхностного слоя детали за счет выбора исходного материала покрытия, определения видов и режимов их нанесения, термической и механической обработки и использования приработочных материалов
Статическая прочность	МПа (предел прочности)	Восстановлением размеров поперечных сечений детали. Заделкой пробоин. Сваркой аварийных трещин
Усталостная прочность	МПа (предел выносливости)	Уменьшением влияния концентраторов напряжений (конструктивных элементов и шероховатости поверхности). Обеспечением необходимой дислокационной структуры материала Удалением материала с усталостными трещинами. Упрочнением материала в зоне технологических трещин. Созданием остаточных сжимающих напряжений
Жесткость	кН/мм, Нм/градус угловой	Повышением модуля упругости материала заготовки путем его объемного пластического деформирования
Дисбаланс	г·см	Распределением массы детали относительно осей вращения и инерции

Под *технологическим модулем* восстановления элемента детали подразумеваем множество технологических операций, необходимых для восстановления одного параметра или свойства геометрического модуля. Каждому конструкторскому модулю ставится в соответствие один или несколько технологических модулей в зависимости от числа восстанавливаемых геометрических параметров и эксплуатационных свойств:

$$[K_j^{(i)}] = [T\Gamma_1^{(i)}, T\Gamma_2^{(i)}, T\Gamma_3^{(i)}, T\Gamma_4^{(i)}, T\mathcal{E}_1^{(i)}, T\mathcal{E}_2^{(i)}, \dots, T\mathcal{E}_k^{(i)}], \quad (1)$$

где $T\Gamma_1^{(i)}, T\Gamma_2^{(i)}, T\Gamma_3^{(i)}$ и $T\Gamma_4^{(i)}$ – технологические модули соответственно для восстановления геометрического параметра (расположения, формы, размера и шероховатости) j -го конструкторского модуля i -й детали; $T\mathcal{E}_1^{(i)}, T\mathcal{E}_2^{(i)}, \dots$, и $T\mathcal{E}_k^{(i)}$ – технологические модули соответственно для восстановления 1-го, 2-го, ..., k -го эксплуатационного свойства указанного конструкторского модуля.

Количество видов технологических модулей намного меньше числа конструкторских модулей. Каждый технологический модуль в свою очередь требует для своей реализации применения различного оборудования, приспособлений и инструментов с затратами труда, материалов и энергии. Виды используемых средств технологического оснащения, а также виды и объемы потребления производственных ресурсов вариативны, зависят от видов восстанавливаемых элементов деталей, их размеров, требований к надежности и подлежат оптимизации.

Оптимизация технологических модулей. Технологический модуль состоит из ряда операций (рис. 1), каждая из которых может быть представлена различными видами. Например, операция типа «нанесение покрытия» может быть представлена такими ее видами: наплавка, напыление, химическое или электрохимическое нанесение и др. Учитывают лишь те операции, которые обеспечивают установленные ограничения по качеству и производительности. Связное подмножество разнотипных операций определяет один вариант технологического процесса. Наилучшее подмножество их определяют с помощью принципа оптимальности Р. Беллмана [4], используя свойство аддитивности целевой функции по составным частям процесса.

Решают рекуррентное уравнение

$$Z_{i+1} = \min (\text{по всем вершинам графа}) [Z_{(i+1)-1} + Z_i], \tag{2}$$

где i – шаги решения; Z_i – затраты на выполнение i операций при условии, что они выбраны оптимальным образом; Z_{i+1} – затраты, отнесенные к $i+1$ операциям; $Z_{(i+1)-1}$ – затраты, отнесенные к присоединению $(i+1)$ -й операции процесса к i его операциям.

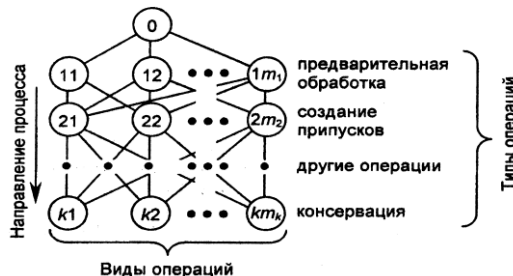


Рис. 1. Граф вариантов технологического процесса восстановления детали:
1, 2, ..., k – типы операций; m_1, m_2, \dots, m_k – количество видов операций каждого типа

Принцип оптимальности заключается в том, что, каково бы ни было состояние системы в результате определенного числа шагов, последующее управление на ближайшем шаге выбирается таким образом, чтобы оно в совокупности с оптимальным управлением на всех последующих шагах приводило к максимальному выигрышу на всех оставшихся шагах, включая данный.

Из технологических модулей восстановления всех параметров и свойств детали составляют процесс ее восстановления (рис. 2).



Рис. 2. Схема технологического процесса восстановления детали

При этом технологические модули пройдут декомпозицию, а образовавшиеся их части в виде операций будут включены в блоки общего технологического процесса восстановления детали. Таким образом, однотипные операции (термической и механической обработки и др.) при обеспечении различных свойств детали объединяют в блоки операций и выполняют вместе. Однако технологический процесс восстановления деталей не простая сумма технологических модулей, а их система. Меньший объем работ обусловлен совмещением ряда механических и термических операций с сокращением числа установок заготовки.

Последовательность блоков технологического процесса подчинена уточнению геометрических параметров детали, а также накоплению и усилению необходимых ее свойств под влиянием вложенных материалов и энергии в ремонтную заготовку. Начальный блок операций включает предварительную обработку резанием элементов заготовки под установку дополнительных ремонтных деталей (ДРД), напыление и нанесение гальванических покрытий. Следующий блок операций включает нанесение восстановительных покрытий и установку ДРД. Если наносят покрытия наплавкой с большим вложением тепла в материал заготовки, то этот блок операций отделяют от остальной части процесса термической обработкой (отжигом), которая служит технологическим «барьером» для внутренних напряжений, роста зерна материала и деформации детали. Последующие блоки операций включают черновую обработку резанием, упрочняющую термическую (химико-термическую) обработку, поверхностное пластическое деформирование материала, чистовую обработку резанием и отделку. В заключительную часть общего процесса восстановления детали включают балансировку и восстановление ее массы, очистку от технологических загрязнений и контроль. Каждый из технологических модулей после оптимизации оформляют в виде типового технологического процесса операционного описания.

Сопоставлялись затраты на разработку технологической документации и средств технологического оснащения, связанных с подготовкой единичных и модульных процессов восстановления деталей типа валов. При малых объемах подготовки производства затраты на разработку модульных процессов и средств превышают затраты на разработку единичных процессов и средств. При росте объемов подготовки производства соотношение затрат изменяется в пользу модульных процессов и средств.

Системный эффект от применения предлагаемой организации выражается в уменьшении трудоемкости технологической подготовки ремонтного производства. Основной методологический принцип в организации работ заключается в применении ограниченного числа технологических модулей к восстановлению неограниченного количества деталей. Модульные процессы сводят к минимуму разнообразие технологической документации и средств технологического оснащения, исключают дублирование работ в области технологической подготовки ремонтного производства, позволяют повысить его серийность и организовать поточную организацию труда при меньших объемах выпуска продукции.

Заключение. Использование классификации конструктивных элементов восстанавливаемых деталей позволяет сократить объем подготовки ремонтного производства, выраженный количеством технологических документов и исполнительных агрегатов технологических машин. Определено содержание технологических модулей восстановления геометрических параметров и эксплуатационных свойств отдельных конструктивных элементов различных деталей. Эффект от использования предложенной концепции выражается в обеспечении нормативного качества восстанавливаемых деталей при меньших затратах на подготовку производства.

ЛИТЕРАТУРА

1. Технология авторемонтного производства: учебник / А.И. Асриянц [и др.]; под ред. К.Т. Кошкина. – М.: Транспорт, 1969. – 568 с.
2. Ремонт дорожных машин, автомобилей и тракторов: учебник / Б.С. Васильев [и др.]; под ред. В.А. Зорина. – М.: Мастерство, 2001. – 512 с.
3. Иванов, В.П. Новая концепция восстановления деталей / В.П. Иванов, А.П. Кастрюк // Вестн. Полоц. гос. ун-та. Серия В. Промышленность. Прикладные науки. – 2010. – № 8. – С. 3 – 10.
4. Беллман, Р. Динамическое программирование / Р. Беллман; пер. с англ. – М.: Иностран. лит., 1960. – 400 с.

Поступила 01.06.2012

MODULE PROCESSES OF COMPONENT RESTORATION IN REPAIR PRODUCTION

A. KASTRYUK, V. IVANOV

Design and technological modules of recoverable components are defined on the basis of classification of their elements. The content of technological modules is given, which provide restoration of geometric parameters and operating properties of the structural elements of components. The structure of the technological process of a component restoration from technological modules is shown and the efficiency of the proposed conception is justified.

УДК 621:677.024.5

СИНТЕЗ ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНЫХ МЕХАНИЗМОВ РЕГУЛИРОВАНИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ПРОЦЕССА НА СТАНКАХ

канд. техн. наук, доц. **О.Я. СЕДЕЛЬ**
(Брестский государственный университет им. А.С. Пушкина)

Представлен анализ дифференциальных передач с внешним и внутренним зацеплением зубчатых колес. Рассматриваются теоретические выражения, связывающие частоты вращения основных звеньев дифференциалов. Выполнен расчет и составлены графические зависимости частоты вращения звеньев для выбора рабочих зон регулируемой скорости. Окончательный выбор структуры дифференциала производится с учетом распределения моментов между основными звеньями дифференциала.

Регулирование технологического процесса на станках обеспечивается дифференциальными механизмами за счет регулирования скорости ведомого звена суммированием двух скоростей: от главного вала станка и управляемого электродвигателя, связанного с дифференциальным механизмом. Угловая скорость главного вала станка является постоянной величиной, в то время как скорость управляемого электродвигателя, связанного с датчиком контроля хода технологического процесса, является переменной величиной. Суммирование этих двух движений в каждый момент времени позволяет регулировать угловую скорость ведомого звена машины, поддерживая параметры технологического процесса в заданных параметрах.

Примером использования дифференциального привода для регулирования технологического процесса может служить регулирование скорости подачи нитей основы на ткацких автоматических станках СТБ по мере изменения диаметра намотки нитей на «навое». Составляющей переменной этих движений является скорость электродвигателя, которая меняется по мере уменьшения диаметра навивки основы на «навое» и требует увеличения его угловой скорости для равномерной подачи нитей в зону формирования ткани. Контроль диаметра навивки основы на «навое» осуществляется от датчика, установленного на «навое» и управляющего электродвигателем дифференциала. Скорость электродвигателя может увеличиваться или уменьшаться от начального значения в зависимости от выбранной структуры дифференциального привода и его передаточного отношения.

Основная часть. Основной задачей синтеза дифференциальных приводов является выбор рационального передаточного отношения, которое определяет габариты передачи, обеспечивает диапазон регулируемых скоростей между ведущими звеньями дифференциала.

Структура дифференциально-планетарного привода может быть представлена в виде редуктора и мультипликатора, а по передаточным отношениям их можно разделить на два типа передач: 1) с внутренним зацеплением зубчатых колес, когда передаточное отношение меньше нуля $i_0 < 0$; 2) с внешним зацеплением зубчатых колес, когда передаточное отношение больше нуля $i_0 > 0$.

Дифференциальный механизм относится к механизму, у которого при блокировке двух основных звеньев можно получить прямую передачу, т.е. заставить механизм вращаться как одно звено.

Ориентировочно конструктивные размеры дифференциальных передач с тремя основными звеньями могут быть определены, если известно внутреннее передаточное отношение i_{BA}^H при остановленном «водителе». Как показывает анализ величин внутреннего передаточного отношения дифференциала i_0 , нашедших практическое применение в планетарных и дифференциальных передачах, наибольшее распространение нашли схемы с передаточным отношением $i_0 = 1 \dots 14$ [1].

Рассмотрим основные типы дифференциальных передач, которые могут быть использованы в качестве исполнительного механизма в системе регулирования скорости подачи нитей основы на ткацких автоматических станках.

На рисунке 1 представлены кинематические схемы дифференциальных передач с двумя сателлитами и внешним зацеплением зубчатых колес.

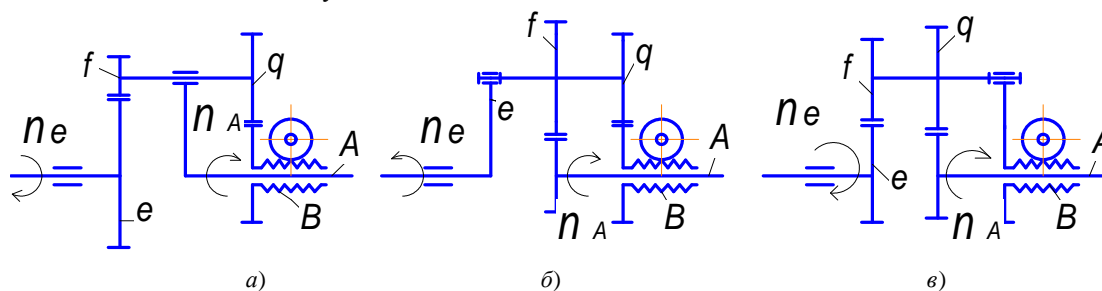


Рис. 1. Кинематические схемы дифференциальных передач с внешним зацеплением зубчатых колес

Запишем выражения, связывающие частоты вращения основных звеньев дифференциальных механизмов, представленных на рисунке 1 [1]:

$$n_B = i_{BA}^e n_A + i_{Be}^A n_e = (1 - i_{Be}^A) n_A + i_{Be}^A n_e; \quad (1)$$

$$n_B = i_{BA}^e n_A + i_{Be}^A n_e = i_{BA}^e n_A (1 - i_{BA}^e) n_e; \quad (2)$$

$$n_B = i_{BA}^e n_A + i_{Be}^A n_e = 1 / (1 - i_{Ae}^B) n_A + i_{Ae}^B / (i_{Ae}^B - 1) n_e, \quad (3)$$

где n_B – частота вращения звена, связанного с ведомым валом механизма; n_A – частота вращения звена, связанного с приводом механизма подачи нитей на станке; n_e – частота вращения звена, связанного с управляемым электродвигателем; $i_{Be}^A = i_o$ – внутреннее передаточное отношение дифференциала.

Выразим уравнения (1), (2), (3) относительно частоты вращения звена n_e , связанного с регулируемым электродвигателем, для установления связи частоты вращения двигателя с частотой вращения ведомого звена n_B и ведущего звена n_A станка.

$$n_e = [n_B - (1 - i_{Be}^A) n_A] / i_{Be}^A; \quad (4)$$

$$n_e = (n_B - i_{BA}^e n_A) / (1 - i_{BA}^e); \quad (5)$$

$$n_e = [n_B - 1 / (1 - i_{Ae}^B) n_A] / i_{Ae}^B / (i_{Ae}^B - 1), \quad (6)$$

где

$$i_{Be}^A = \frac{z_e \cdot z_q}{z_f \cdot z_b}; \quad i_{BA}^e = \frac{z_a \cdot z_f}{z_q \cdot z_b}; \quad i_{Ae}^B = \frac{z_b \cdot z_q}{z_f \cdot z_a}.$$

На рисунке 2 представлены кинематические схемы дифференциальных передач с внутренним зацеплением зубчатых колес.

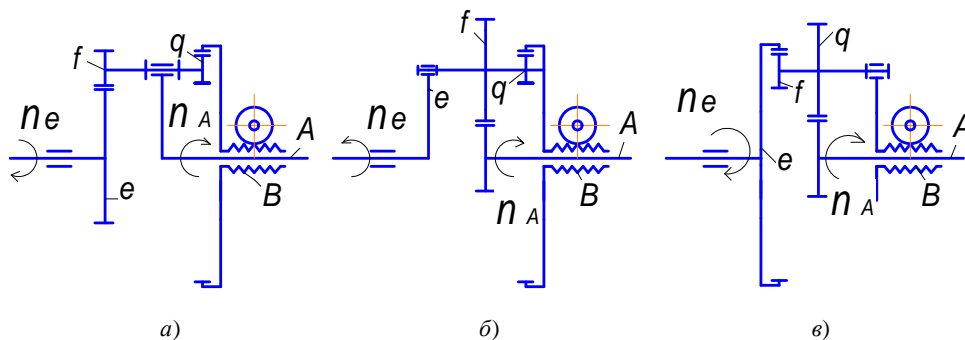


Рис. 2. Кинематические схемы дифференциальных передач с внутренним зацеплением зубчатых колес

Запишем выражения, связывающие частоту вращения основных звеньев дифференциалов с внутренним зацеплением зубчатых колес:

$$n_B = i_{BA}^e n_A + i_{Be}^A n_e = (1 - i_{Be}^A) n_A + i_{Be}^A n_e, \quad (7)$$

где $i_{Be}^A = (-z_e / z_f)(z_q / z_b) = -z_e z_q / z_b / z_f$;

$$n_B = (1 + i_{BA}^e) n_e - i_{BA}^e n_A. \quad (8)$$

Здесь $i_{BA}^e = -z_a / z_f \cdot z_q / z_b$.

$$n_B = [1 / (1 + i_{Ae}^B)] n_A + [1 / (1 + i_{Ae}^B)] n_e, \quad (9)$$

где $i_{Ae}^B = -z_e / z_q \cdot z_f / z_a$.

Определим из уравнений (7), (8), (9) частоту вращения звена e , связанного с электродвигателем:

$$n_e = [(1 + i_{Be}^A) n_A - n_B] / i_{Be}^A; \quad (10)$$

$$n_e = (n_B + i_{BA}^e n_A) / (1 + i_{BA}^e); \quad (11)$$

$$n_e = [n_B - 1 / (1 + i_{Ae}^B) n_A] / [1 / (1 + 1 / i_{Ae}^B)]. \quad (12)$$

На рисунке 3 представлены графические зависимости частоты вращения звена e дифференциальных механизмов с внешним и внутренним зацеплением зубчатых колес при $n_{зл.е} = 240 \text{ мин}^{-1}$; $n_b^{\text{min}} = 0,1 \text{ мин}^{-1}$ для автоматических ткацких станков СТБ.

Анализ графических зависимостей для передач с внешним зацеплением показывает, что для выбранных скоростей вращения наибольшее предпочтение имеет механизм, представленный на рисунке 1, $в$. В этом механизме рабочий диапазон скоростей звена B обеспечивается передаточным отношением от 0,2 до 1,4.

На рисунке 3 зона 1 является рабочей зоной, в которой двигатель не меняет направления вращения. В зависимости от направления вращения звена e , связанного с электродвигателем, и величины передаточного отношения i_o , возможны случаи нереверсивного режима работы двигателя (зона 1) и реверсивного режима (зона 2, 3), когда для обеспечения всего диапазона регулирования скорости n_B необходимо менять направление вращения двигателя, что нецелесообразно в условиях работы станка. Поэтому в системах регулирования технологического процесса необходимо выбирать привод таким образом, чтобы система работала в нереверсивном режиме.

Зона 2 на рисунке 3, ограниченная кривыми a и a' , является нерабочей зоной, так как на этом промежутке передаточных отношений i_o дифференциал не обеспечивает регулирования скорости n_B от 0,1 до 200 мин^{-1} .

При использовании в приводе схемы дифференциального механизма с внешним зацеплением колес согласно рисунку 3 целесообразно выбрать передаточное отношение больше 1,0. Зона 3, ограниченная кривыми $б$ и $б'$, является нерабочей зоной для передаточных отношений дифференциалов до 1,2.

На рисунке 4 зона 2 – нерекомендуемая рабочая зона ввиду большой разницы между минимальной и максимальной частотой вращения колеса e , связанного с управляемым электродвигателем. Дифференциальный механизм, представленный на рисунке 4, может быть использован с любым передаточным отношением i_o для данного диапазона скорости от 0,1 до 200 мин^{-1} ведомого звена.

Зона 1 для механизма на рисунке 4 – зона нереверсивного движения двигателя на всем промежутке регулирования скорости n_B при любых $i_o < 0$.

Дифференциальный механизм, представленный на рисунке 4, имеет ограниченную рабочую зону электродвигателя с нереверсивным движением.

Зона 2 определяет регулирование в пределах передаточного отношения от $-0,2$ до $-0,3$. Зона 3, ограниченная кривыми $в$ и $в'$, для заданного диапазона скоростей n_B является нерабочей зоной.

При выборе рабочей зоны работы электродвигателя с нереверсивным движением необходимо иметь в виду, что широкий диапазон изменения частоты вращения звена e для регулируемых двигателей постоянного тока малой мощности, применяемых в системах автоматического регулирования, приводит к значительному снижению мощности двигателя при его работе на низких частотах вращения.

Поэтому целесообразно между двигателем и дифференциалом устанавливать понижающий редуктор, а скорости двигателя должны достигать максимально возможных значений. Разницу между максимальной и минимальной регулируемой скоростями электродвигателя будем называть диапазоном скоростей (D).

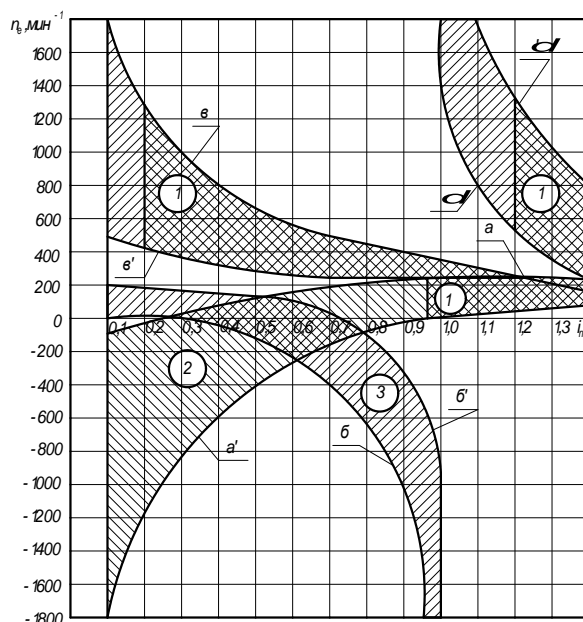


Рис. 3. Графические зависимости частоты вращения ведущего звена дифференциальных механизмов с внешним зацеплением зубчатых колес

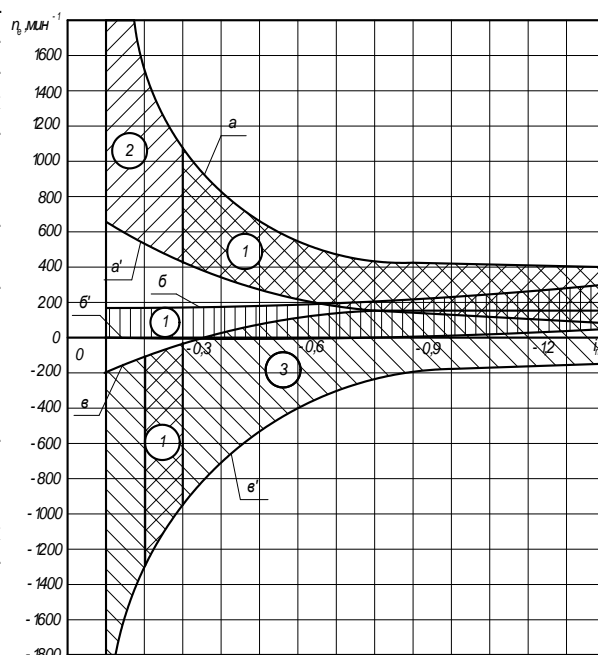


Рис. 4. Графические зависимости частоты вращения ведущего звена дифференциальных механизмов с внутренним зацеплением зубчатых колес

Для того чтобы повысить чувствительность и точность регулирования технологического процесса, целесообразен значительный диапазон скоростей электродвигателя.

Анализ дифференциальных приводов показал, что приводы с внешним зацеплением зубчатых колес технологичнее и проще по конструкции. Из схем, представленных на рисунках 1 и 2, целесообразнее по величине диапазона регулируемых скоростей использовать схемы 1, а и 2, б.

Окончательный выбор структуры дифференциала производится с учетом распределения моментов между основными звеньями дифференциала.

Распределение моментов и мощностей в дифференциальном приводе при установившемся движении определяется по уравнению:

$$M_A + M_H + M_B = 0, \tag{13}$$

где M_A, M_H, M_B – моменты на центральных колесах A, B и на «водителе» H .

Если известна величина и направление момента, действующего на одно из центральных колес, то без учета потерь на трение моменты, действующие на другие звенья механизма, определяются следующим образом [1]:

$$-M_H / M_B = 1 / i_{HB}^A, \quad -M_A / M_B = 1 / i_{AB}^H, \tag{14}$$

или так как $1/i_{HB}^A = (1 - i_{AB}^H)$ и $1/i_{AB}^H = i_{BA}^H$, то $M_H = -M_B(1 - i_{BA}^H)$; $M_A = -M_B i_{BA}^H$. (15)

Для решения вопроса о распределении мощности в дифференциальном приводе необходимо определить направление действующих в передаче моментов.

На рисунке 5 представлена схема движения звеньев дифференциального привода с управляемой скоростью водила.

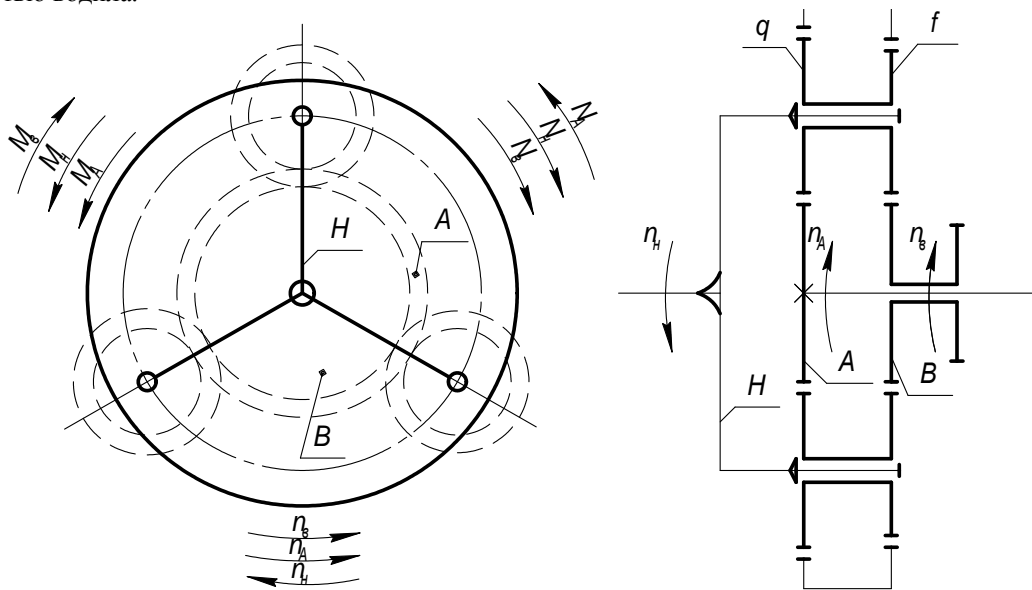


Рис. 5. Схема движения звеньев дифференциального привода с управляемой скоростью водила

Для того чтобы узнать, какое из звеньев, H или B , является ведущим в движении относительно центрального колеса A , надо определить знак φ_H и φ_B из уравнений:

$$\varphi_H = N_H^A / N_H = M_H (n_H - n_A) / M_H n_H = 1 - i_{AH}^B = 1 - (1 - i_{AB}^H) = i_{AB}^H; \tag{16}$$

$$\varphi_B = N_B^A / N_B = M_B (n_B - n_A) / M_B n_B = 1 - i_{AB}^H, \tag{17}$$

где φ_H, φ_B – отношение мощности водила и колеса в относительном и абсолютном движении; N_H^A и N_B^A – мощности в зацеплении; i_{AB}^H – передаточное отношение в дифференциале.

При $i_{AB}^H = z_B / z_F \cdot z_Q / z_A = 30 / 21 \cdot 24 / 27 = 1,269$;

$$\varphi_H = 1,269; \quad \varphi_B = 1 - 1,269 = -0,269.$$

Таким образом, $\varphi_H > 0$, а $\varphi_B < 0$.

Так как в дифференциальном приводе принимается ведущим звено A , то $M_A > 0$; величину и направление моментов в этом случае определим следующим образом:

$$-M_H / M_B = 1 / i_{AB}^H; \quad -M_A / M_B = 1 / i_{AB}^H, \text{ или}$$

$$M_H = -M_B(1 / i_{HB}^A) = -M_B(1 - 0,787) = -0,212M_B; \quad (18)$$

$$M_A = -M_B(1 / i_{AB}^H) = -M_B(1 / 1,2699) = -0,788M_B. \quad (19)$$

Направление моментов M_A и M_H не совпадает с направлением момента M_B , т.е. моменты M_A и M_H являются ведущими, а момент M_B ведомым.

Потребная мощность в дифференциальном приводе определяется уравнениями:

$$N_A = M_A \omega_A; \quad N_H = M_H \omega_H; \quad N_B = M_B \omega_B. \quad (20)$$

Направление вращения звеньев и моментов в дифференциальном приводе показано на рисунке 5.

Закон сохранения энергии для дифференциального привода можно записать:

$$M_A \omega_A + (-M_B) \omega_B + M_H (-\omega_H) = N_A - N_B - N_H = 0. \quad (21)$$

Угловая частота вращения звеньев дифференциала по аналогии с уравнением скоростей и с учетом направления вращения ведущих звеньев A и H выразится следующим образом:

$$\begin{aligned} \omega_B &= -(1 - i_o) \omega_H + i_o \omega_A; \\ \omega_H &= (i_o \omega_A - \omega_B) / (1 - i_o); \end{aligned} \quad (22)$$

$$\omega_A = [\omega_B + (1 - i_o) \omega_H] / i_o.$$

С учетом уравнений (14), (20), (22) мощности ведомых и ведущих звеньев дифференциального привода, выраженные через M_B , будут равны:

$$\begin{aligned} N_A^{\max} &= N_B^{\max} i_o \{[\omega_B^{pac.\min} + (1 - i_o) \omega_H]\} / i_o; \\ N_A^{\max} &= M_B^{\max} [i_o \omega_A - (1 - i_o) \omega_H]; \end{aligned} \quad (23)$$

$$N_H^{\max} = -M_B^{\max} (i_o - i_o) [-(i_o \omega_A - \omega_B^{pac.\min}) / (1 - i_o)].$$

Соответственно, для минимальной мощности на ведомых и ведущих звеньях

$$\begin{aligned} N_A^{\min} &= N_B^{\min} i_o \{[\omega_B^{pac.\max} + (1 - i_o) \omega_H]\} / i_o; \\ N_A^{\max} &= M_B^{\min} [i_o \omega_A - (1 - i_o) \omega_H]; \end{aligned} \quad (24)$$

$$N_H^{\min} = -M_B^{\min} (i_o - i_o) [-(i_o \omega_A - \omega_B^{pac.\max}) / (1 - i_o)].$$

Определим зависимость распределения мощности в приводе с учетом передаточного отношения для данной структуры дифференциала.

Регулируемая частота вращения водила ω_H с учетом ω_B^{\min} и ω_B^{\max} и направления вращения ведущих звеньев определим из уравнения (22).

Для начальных параметров $\omega_B^{\max} = 143$ Н·м; $\omega_B^{\min} = 52,4$ с⁻¹; $M_B^{\min} = 64$ Н·м; $\omega_B^{\max} = 104,7$ с⁻¹; $\omega_A = 151,84$ с⁻¹ выполнен расчет потребной мощности привода при различных значениях передаточного отношения дифференциала из уравнений (23), (24), что отображено на рисунке 6.

В заданном интервале передаточных отношений дифференциала i_o диапазон угловых скоростей водила «H» ограничивается кривыми ω_H^{\max} , ω_H^{\min} во встречном и попутном вращении относительно центрального колеса «A». При этом на преодоление полезной работы на ведомом колесе «B» расход мощности ведущих звеньев «H» и «A», связанных соответственно с управляемым электродвигателем постоянного тока, неоднозначный. Пределы потребляемой мощности на ведущих звеньях N_A и N_H представлены диапазонами, для которых характерно то, что в любом сечении «n – n» выполняется баланс мощности, как это показано на рисунке 6. Такое же равенство баланса мощностей получается в любом рассматриваемом сечении. Разница лишь в том, что при передаточных отношениях $i_o \ll 1$ для преодоления полезной работы потребная мощность ведущих звеньев меньше, чем при отношениях дифференциала $i_o > 1$.

Так, в сечении « $n - n$ » справедливо равенство, получаемое проектированием точек пересечений линий « $n - n$ » с прямыми N_A^{\max} , N_H^{\max} и N_B^{\max} или N_A^{\min} , N_H^{\min} и N_B^{\min} на ось N :

$$N_B^{\max} = N_A^{\max} + N_H^{\max}; \quad -7,5 = 13,03 - 5,53.$$

Кроме того, до $i_o \leq 0,2$ основная мощность отбирается от двигателя постоянного тока, связанного с водилом « H », а при $i_o > 0,2$ основная мощность отбирается от двигателя переменного тока, связанного с центральным колесом « A ». С увеличением передаточного отношения i_o мощность двигателя постоянного тока (водило H) переходит из ведущей ($+N_H$) в ведомую мощность ($-N_H$).

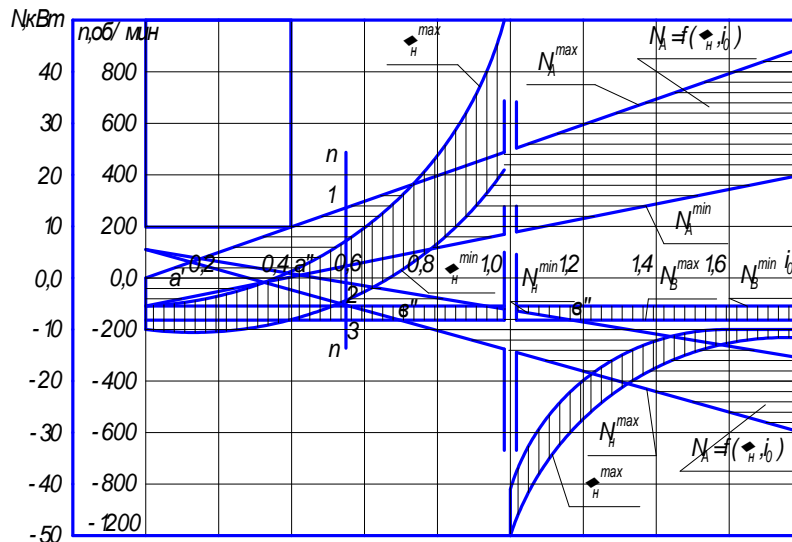


Рис. 6. Мощность дифференциального привода с ведущим водилом

Аналогичная картина наблюдается и для минимальной мощности звеньев, но лишь при других передаточных отношениях.

На графиках имеются особые точки « a » и « b », в которых пересекаются прямые N_H и N_A , N_B .

Точка « a_1 » – точка пересечения прямых N_H и N_A , точка « b_1 » – точка пересечения прямых N_H и N_B .

Соответственно, для точки « a_1 », можно установить, что полезная мощность N_B преодолевается равными долями от ведущих звеньев « A » и « H », т. е. $-N_B = 0,5N_H + 0,5N_A$.

Таким образом, получаем для данного примера:

$$-7,5 \text{ кВт} = 3,75 \text{ кВт} + 3,75 \text{ кВт}.$$

Для точки « b_1 » характерным является $-N_B = -N_H$, и баланс мощностей в этом случае запишется:

$$-7,5 \text{ кВт} = -7,5 \text{ кВт} + 15 \text{ кВт}, \text{ где } N_A = 15 \text{ кВт}.$$

Исследуем случай, когда электродвигатель постоянного тока, связанный с водилом « H », может быть взят минимальной мощности, т.е. $N_H = > 0$. Для этого установим связь между мощностью водила и передаточным отношением дифференциала i_o привода:

$$N_H = M_H \omega_H. \tag{25}$$

Подставив вместо M_H и ω_H значения из уравнения (15), (22) и произведя преобразования, получим:

$$N_H = M_B [(1 - i_o)(-\omega_H - i_o \omega_A) / (1 - i_o)] = -N_B + N_B \omega_A i_o; \tag{26}$$

$$N_H = -N_B + N_B (\omega_A / \omega_B) i_o.$$

В уравнении (26) мощность ведомого звена N_B выражена через передаточное отношение и угловую скорость ведомого звена « B » и ведущего звена « A ». Мощность N_H будет стремиться к минимуму, если множитель при N_B будет равен 1, т. е. $(\omega_A / \omega_B) i_o = 1$. Отсюда найдем передаточное отношение i_o , при котором

$$N_H = > 0, \text{ т. е. } i_o = \omega_B / \omega_A. \tag{27}$$

Из уравнения (26) можно также установить зависимость передаточного отношения дифференциала i_o от мощности и частоты вращения основных звеньев привода:

$$i_o = \omega_B / \omega_A (1 - N_H / N_B). \quad (28)$$

Аналогично находим условия оптимизации N_H от i_o и N_A :

$$N_H = M_H \omega_H = M_A [(1 - i_o) / i_o] - [(\omega_H + i_o \omega_A) / (1 - i_o)],$$

откуда
$$N_H = N_A - N_A \omega_B / \omega_A (1 / i_o); i_o = \omega_B / \omega_A [1 / (1 - N_H / N_A)]. \quad (29)$$

Минимум N_H будет в случае, если в уравнении (29) множитель при N_A будет равен единице, т.е. $\omega_B / \omega_A (1 / i_o) = 1$,

откуда
$$i_o = \omega_B / \omega_A. \quad (30)$$

Заключение. Регулирование технологического процесса на станках – актуальная проблема для выпуска качественной и конкурентоспособной продукции.

Особенностью систем регулирования технологических процессов с помощью дифференциальных механизмов является использование простых механических передач с управляемыми электродвигателями малой мощности. Данные механизмы можно использовать в различных механических системах для регулирования скорости производственного процесса.

ЛИТЕРАТУРА

1. Планетарные передачи: справочник / под ред. В.К. Кудрявцева, Ю.Н. Кирдяшева. – Л.: Машиностроение, 1977.
2. Кирдяшев, Ю.Н. Многопоточные передачи дифференциального типа / Ю.Н. Кирдяшев. – Л.: Машиностроение, 1977.

Поступила 23.02.2012

SYNTHESIS OF DIFFERENTIAL REGULATION MECHANISMS OF ENGINEERING PROCESS FOR MACHINES

O. SEDEL

This paper presents the analysis of differential gears with external and internal catching and the theoretical expressions connecting the frequency of rotation of the main sections of differentials. Calculation and graphic dependences of the frequency of link rotation for selection of a workspace of variable speed are made. The final choice of the differential structure is made taking into account the distribution of moments among the basic links of the differential.

УДК 687.053:004

МЕТОДИКА ПРОЕКТИРОВАНИЯ МЕХАНИЗМА АВТОМАТИЧЕСКОЙ ОБРЕЗКИ НИТОК МНОГОГОЛОВОЧНОГО ВЫШИВАЛЬНОГО ПОЛУАВТОМАТА С МПУ

С.Ю. КРАСНЕР, д-р техн. наук, проф. Б.С. СУНКУЕВ
(Витебский государственный технологический университет)

Представлена методика проектирования механизмов автоматической обрезки ниток, включающая в себя: составление исходных требований на проектирование нового механизма; выбор структуры; разработку схемы; расчет технологических параметров механизма; экспериментальное исследование зависимости силы, действующей на подвижный нож, от относительной деформации нитки; программный продукт, рассчитывающий по заданным параметрам величину силы, которая возникает в процессе резания швейной нитки; разработку требований для конструктивных решений, обеспечивающих гарантированную обрезку; реализацию конструктивных решений; оптимизацию кинематических и динамических параметров механизма автоматической обрезки ниток.

Цель работы – создание научно обоснованной методики проектирования механизмов автоматической обрезки ниток, позволяющей гарантированно обрезать швейную нитку за минимальное время.

1. Исходные требования на проектирование нового механизма

Технологические требования. Длина нитки, остающейся в игле после обрезки, должна быть достаточной для устойчивого образования первого челночного стежка без выдергивания нитки из ушка иглы:

- 1) длина остатка игольной нитки, остающейся на лицевой поверхности материала при выполнении первого стежка после обрезки, не должна превышать заданного значения;
- 2) длина остатка игольной нитки, остающейся на изнаночной стороне материала в начале строчки, не должна превышать заданного значения;
- 3) длина нитки, остающейся в челноке после обрезки, должна быть достаточной для устойчивого процесса образования первого челночного стежка;
- 4) длина остатка челночной нитки на изнаночной стороне материала не должна превышать заданного значения;
- 5) время t , в течение которого срабатывает приспособление для обрезки ниток, должно быть равно или меньше некоторого времени $t_{эф}$, начиная с которого применение устройства для обрезки ниток становится экономически эффективным (по сравнению с ручной обрезкой).

Конструктивные требования:

- 1) механизм должен быть создан по блочно-модульному принципу;
- 2) механизм должен состоять из шагового электродвигателя, передаточного механизма, режущего устройства;
- 3) система управления ШД механизма автоматической обрезки должна быть интегрирована в систему МПУ полуавтомата;
- 4) полуавтомат, для которого применяется механизм автоматической обрезки, должен быть оснащен автоматизированным приводом, обеспечивающим регулирование скорости, останов иглы в заданном положении, управляющим механизмом автоматической обрезки;
- 5) режущее устройство не должно препятствовать работе других механизмов полуавтомата;
- 6) в механизме должен быть обеспечен доступ к местам регулировки и смазки;
- 7) в механизме должен регулироваться натяг режущих кромок ножей.

Эксплуатационные требования:

- 1) стойкость ножей обрезки ниток без перезаточки – не менее 60 рабочих смен;
- 2) на 100 циклов срабатываний автоматических устройств допускается не более одного из следующих сбоев в работе: необрезка ниток; выдергивание нитки из ушка иглы.

2. Проектирование механизма автоматической обрезки ниток

Выбор структуры механизма. Поставлена задача модернизации вышивального полуавтомата «Текстима». Машина относится к швейным машинам с плоской платформой, вид стежка – челночный, челнок качающийся. Модернизируемая машина – вышивальная, поэтому над поверхностью игольной пластины двигаются пальцы, что делает применение раздельной обрезки нецелесообразным.

Модернизация полуавтомата производится путем внедрения МПУ для перемещения координатного устройства и использования шаговых электродвигателей для привода исполнительных механизмов. Использование для управления механизмом автоматической обрезки микропроцессорного управления не приводит к значительному усложнению управляющей системы.

В классификационной схеме остается ряд пунктов [1], которые выбираются исходя из конструктивных соображений. Для упрощения конструкции нами выбран метод совместной обрезки игольной и челночной ниток. Ориентируясь на возможности МПУ, был выбран цикловой способ обрезки, так как взаимная увязанность процесса обрезки нитки с процессом петлеобразования дает дополнительный положительный эффект, о котором будет сказано ниже. Расположение ножей выбрано под игольной пластиной, так как расположение над игольной пластиной значительно усложнит привод, а расположение в игольной пластине нецелесообразно из-за необходимости формирования остатков ниток. По количеству ножей устройство относится к многоножевому – состоит из шести пар подвижных и неподвижных ножей. Обрезка будет производиться при прямом ходе ножа, так как нет необходимости минимизировать расстояние между неподвижным ножом и подвижным. Форма подвижных ножей выбрана плоская с элементами объема.

Проектирование механизма производилось с учетом литературных и патентных источников, а также на основе работ по разработке оборудования, произведенных на кафедре МАЛП УО «Витебский государственный технологический университет».

Разработка схемы механизмов автоматической обрезки ниток. Структуру механизмов автоматической обрезки ниток выбираем исходя из принципа модульности этих механизмов. Необходимо все механизмы разработать таким образом, чтобы они могли разместиться на съемных деталях швейной головки – фронтальной доске и игольной пластине, что не потребует обработки рукава швейной головки. Привод механизма ножей желательнее смонтировать на нижней поверхности стола [2].

Кинематическая схема механизма обрезки ниток на многоголовочном вышивальном полуавтомате показана на рисунке 1.

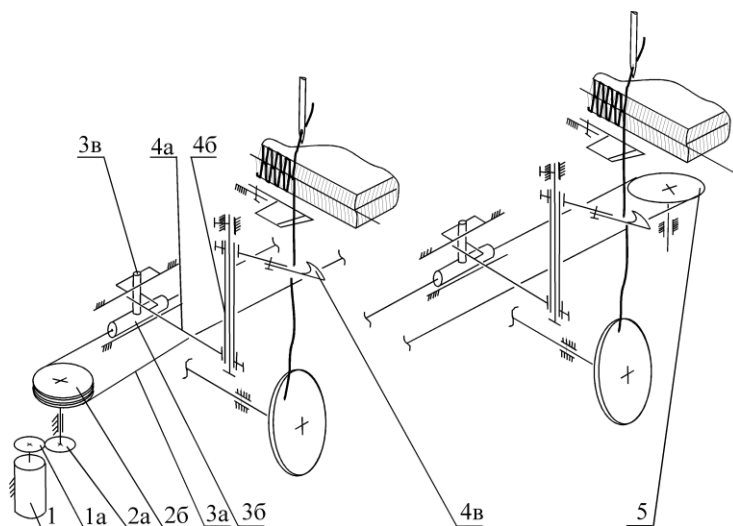


Рис. 1. Кинематическая схема механизма автоматической обрезки на многоголовочном вышивальном полуавтомате

Зубчатое колесо *1а* зафиксировано на роторе шагового двигателя *1* и через зубчатое колесо *2а* передает движение на барабан *2б*, который с роликом *5*, тросом *3а*, ползунами *3б* образует тросовую передачу, которая сообщает поступательное движение пальцам *3в*,двигающимся в направляющих. Пальцы связаны с неподвижными ножами *4в* через втулки *4б* и кулисные рычаги *4а*.

Устройство обрезки ниток работает следующим образом.

При подаче определенного количества импульсов на шаговый двигатель его ротор поворачивается на определенный угол и вместе с ним поворачиваются барабан *2б* и ролик *5*. Трос *3а* получает поступательное движение. Вместе с тросом пальцы *3в* и ползуны *3б* перемещаются на величину, пропорциональную количеству импульсов, поданных на обмотку шагового двигателя. Поступательное движение пальцев *3в* через систему кулисных рычагов *4а*, втулок *4б*, держателей трансформируется во вращательное движение подвижных ножей *4в*. Обрезка производится при взаимодействии подвижных ножей *4в* с неподвижными ножами.

Работа механизмов обрезки обеспечивает должное качество обрезки при взаимодействии с разработанными механизмами освобождения верхней нитки.

Работа и взаимодействие механизмов обрезки ниток, механизмов освобождения игольных ниток и главного вала отражены на тактограмме (рис. 2).

В такте I главный вал швейной головки вращается с рабочей скоростью, происходит процесс вышивания, подвижный нож находится в исходном крайнем левом положении, тарелочки регулятора натяжения игольной нитки обеспечивают натяжение.

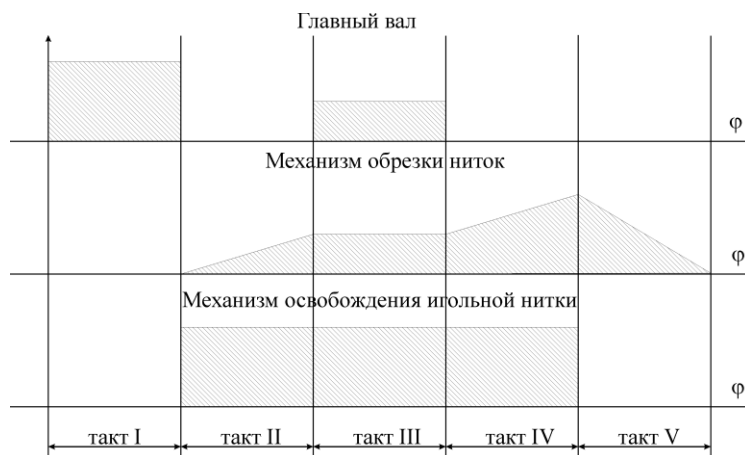


Рис. 2. Тактограмма работы механизмов вышивального полуавтомата

В такте II главный вал останавливается в положении, соответствующем максимальному расширению ветвей игольной нитки в зоне захвата носиком ножа, подвижный нож перемещается вправо (см. рис. 2), входит в пространство между ветвями игольной нитки, продолжает свое движение, удерживая петлю игольной нитки, и останавливается в промежуточном положении, тарелочки регулятора натяжения игольной нитки разжаты, натяжение игольной нитки минимальное.

В такте III главный вал вращается с пониженной угловой скоростью (скорость доводки) и в конце такта останавливается в положении, соответствующем крайнему верхнему положению глазка нитепритягивателя, подвижный нож находится в промежуточном положении, тарелочки регулятора натяжения разжаты.

В такте IV главный вал неподвижен, подвижный нож движется из промежуточного положения в крайнее правое и обрезает игольную и челночную нитки. Тарелочки регулятора натяжения игольной нитки разжаты.

В такте V главный вал неподвижен, подвижный нож перемещается из крайнего правого положения в исходное, тарелочки регулятора натяжения сжаты и удерживают игольную нитку.

Указанное взаимодействие главных валов швейной головки, шагового двигателя, электромагнитов освобождения игольных ниток обеспечивается автоматизированным электроприводом с МПУ и блоком МПУ вышивального полуавтомата.

Расчёт технологических параметров механизма автоматической обрезки ниток

Определение хода ножа. Рабочая часть ножа состоит из трех частей: носика, предназначенного для входа в петлю игольной нитки, наклонной части, предназначенной для удержания петли игольной нитки, режущей кромки, которая во взаимодействии с режущей кромкой неподвижного ножа производит обрезку игольной и челночной ниток.

Исходное положение ножа выбирается из конструктивных соображений: нож должен располагаться настолько правее, насколько позволяет конструкция игольной пластины и платформы.

В среднем положении биссектриса угла, образуемого носиком, должна располагаться перпендикулярно плоскости, образуемой ветвями игольной нитки в момент входа носика. В крайнем левом положении подвижного ножа наклонная режущая часть должна обрезать игольную и челночную нитки таким образом, чтобы длина нитки, остающейся в игле, и длина челночной нитки, остающейся в шпульке, были бы достаточными для образования следующего после обрезки челночного стежка.

Определение длины нитки, остающейся в игле после обрезки. На рисунке 3, а показана трасса игольной нитки от ушка иглы A до точки обрезки B_H (после обрезки).

Длина AB_H длиной ветви, остающейся в игле, определится из формулы

$$AB_H = \sqrt{S_{cm}^2 + (h_0 - h)^2} + h + \delta + S_{cm} + l, \quad (1)$$

где S_{cm} – шаг стежка, $S_{cm} = 1 \dots 6$ мм; h_0 – расстояние от игольной пластины до ушка иглы в момент обрезки игольной нитки; h – толщина материала, $h = (1 \dots 2,5)$ мм; δ – толщина игольной пластины, $\delta = 3$ мм; l – длина игольной нитки на участке: до точки обрезки B_H (см. рис. 3, а), $l = 32$ мм.

Для определения h_g воспользуемся расчетным методом, используя уравнение перемещения иглы:

$$h_g = R(1 - \cos \varphi) - \frac{R^2}{2P} \sin^2 \varphi,$$

где φ – угол поворота кривошипа; R – длина кривошипа (16,5 мм); P – длина шатуна (70 мм). За начало отсчета принято положение кривошипа при верхнем положении иглы. В результате проверочного расчета получено $h_g = 11,75$.

Для определения h_0 воспользуемся схемой (рис. 3, б), где r – радиус окружности носика челнока, равный 18 мм; L – расстояние от центра вращения челнока до игольной пластины, $L = 21,5$ мм.

$$\text{Тогда} \quad h_0 = h_u - h_g - (L - r) - \Delta y - \delta, \quad (2)$$

где h_u – ход иглы, согласно рисунку 3, б; h_u составляет 36 мм, $h_g = 11,7$ мм; Δy – петельный ход иглы, $\Delta y = 2,5$ мм.

Подставив значения h_u , L , r и Δy в формулу (2), получим: $h_0 = 36 - 11,7 - (21,5 - 18) - 2,5 - 3 = 15,3$ мм.

Подставив в формулу (1) значения $S_{cm} = 1$ мм, $h_0 = 15,3$ мм, $h = 1$ мм, $\delta = 3$ мм, $l = 32$ мм, получим $AB_u = 51,3$ мм. Минимальная длина AB_u , при которой имеет место устойчивый процесс образования первого челночного стежка без выдергивания нитки из ушка иглы, определяется из схемы, приведенной на рисунке 3, в.

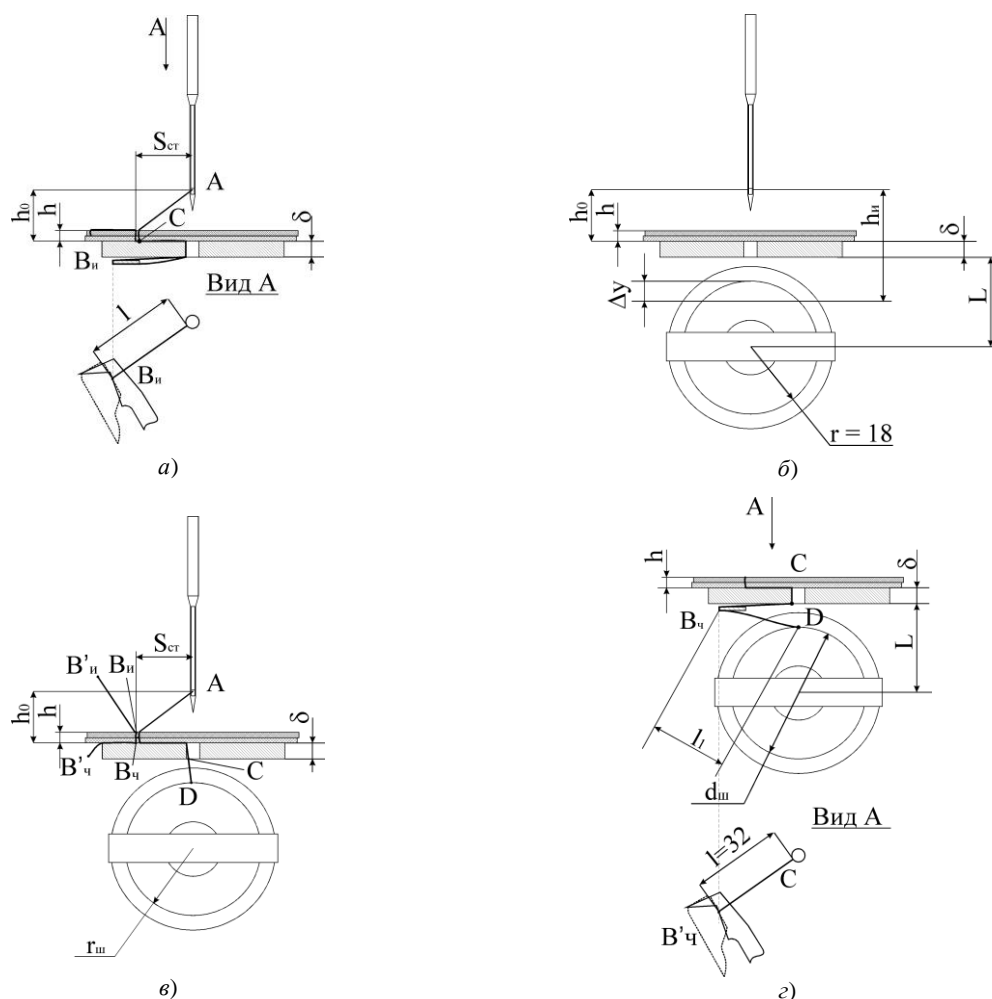


Рис. 3. Технологические схемы:

- a* – к расчету длины игольной нитки AB_u ; *б* – схема для определения h_0 ;
- в* – к расчету минимальной длины конца игольной нитки и длины остатка нитки на лицевой поверхности материала в начале строчки; *г* – схема для определения CB_u

$$AB_{u\min} = \sqrt{(h_0 - h)^2 + S_{cm}^2} + h. \quad (3)$$

Подставив в формулу $h_0 = 15,3$ мм; $S = 1$ мм, $h = 1$ мм, получим: $AB_{u\min} = 15,3$ мм.

Таким образом, длина конца нитки AB_u , остающейся в игле после обрезки, значительно (на 36 мм) превышает минимально необходимую.

Избыток нитки переходит в остаток нитки $B_u B'_u$ (см. рис. 3, в), остающейся на лицевой поверхности материала при выполнении первого стежка после обрезки.

$$B_u B'_u = AB_u - AB_{u\min} = 50,3 - 15,3 = 36 \text{ мм.}$$

Остаток нитки $B_u B'_u$ должен удаляться с лицевой поверхности, что требует выполнения дополнительного технологического перехода.

Длина остатка игольной нитки $B_u C$, остающейся на изнаночной стороне материала в начале строчки, определяется согласно рисунку 3, а:

$$B_u C = l + \delta + S_{cm} = 32 + 3 + 1 = 36 \text{ мм.} \quad (4)$$

Определение длины нитки, остающейся в челноке после обрезки. На рисунке 3, г показана трасса CB_q челночной нитки в момент ее обрезки. На схеме обозначены: d_{uu} – диаметр шпули ($d_{uu} = 30$ мм), $B_q D$ и $B'_q D$ – проекции длины нитки, остающейся в челноке.

Длина нитки, остающейся в челноке после обрезки, определяется следующим образом:

$$B_q D = \sqrt{l^2 + \left(L - \frac{d_{uu}}{2}\right)^2} = \sqrt{32^2 + (21,5 - 14,5)^2} = 32,8 \text{ мм.} \quad (5)$$

Определим минимально необходимую для образования первого после обрезки стежка длину нитки в челноке (см. рис. 3, г):

$$B_q D_{\min} = h + S_{cm} + \delta + \left(L - \frac{d_{uu}}{2}\right) = 1 + 1 + 3 + (21,5 - 14,5) = 12 \text{ мм.} \quad (6)$$

Остающийся запас челночной нитки переходит в остаток челночной нитки на изнаночной стороне материала:

$$B_q B'_q = B_q D - B_q D_{\min} = (32,8 - 12) = 20,8 \text{ мм.}$$

Анализ формул (1) – (6) позволяет установить, что при проектировании механизма возможно манипулировать величиной l (расстоянием от игольного отверстия до точки обрезки игольной и челночной ниток). Различные значения слагаемых формул (1) – (6) сведены в файл электронных таблиц, в котором можно манипулировать базовыми конструктивными параметрами швейной машины и изменяемым параметром l . Полученная в результате система уравнений позволяет установить оптимальное значение длины l для проектируемого механизма

$$\begin{cases} l = AB_u - \sqrt{S_{cm}^2 + (h_0 - h)^2} + h + \delta + S_{cm}; \\ l = B_u B'_u - \sqrt{2S_{cm}^2 + h_0^2 - 2h_0 h + 2h^2 + h} - 2h - \delta - 2S_{cm}; \\ l = B_u C - \delta - S_{cm}; \\ l = \sqrt{B_q B'_q - 2\left(L - \frac{d_{uu}}{2}\right)^2 - h^2 - S_{cm}^2 - \delta^2 - \left(L - \frac{d_{uu}}{2}\right)^2}. \end{cases} \quad (7)$$

Экспериментальное исследование зависимости силы, действующей на подвижный нож, от относительной деформации нитки

Для получения достоверных данных о механических свойствах ниток в момент их обрезания разработана установка, конструкция которой описана в [3].

Методика проведения эксперимента заключается в последовательном нагружении штока индикатора установки осевой силой, а следовательно и лезвия ножа. Величина деформации нити будет отображаться стрелкой индикатора, что даст возможность определить зависимость $\sigma = \delta(P)$.

При экспериментальном определении величины σ минимальное значение массы было равно массе штока, поэтому на участке $[0; \chi]$ получены две точки. Диаметр нитки определялся с помощью электронного микроскопа USB (класс точности 0,1 (ГОСТ 8.401-80)), при этом производится ряд замеров и берется среднее значение.

При описании зависимости $P = f \varepsilon$ функцию будем рассматривать как кусочную. При этом величина относительной деформации ε определяется как $\varepsilon = \frac{\Delta d}{d}$, где d – диаметр нитки, Δd – изменение диаметра нитки под воздействием штока установки.

В результате проведенных исследований определены зависимости силы P , действующей на нож, от относительной деформации ε нитки. Полученная зависимость представлена в виде системы уравнений, где k_1 , k_2 , h и χ – коэффициенты, зависящие от свойств обрезаемой нитки:

$$\left. \begin{aligned} P &= k_1 \varepsilon, & \text{если } 0 \leq \varepsilon \leq \chi; \\ P &= k_2 \varepsilon + h, & \text{если } \chi < \varepsilon \leq 1. \end{aligned} \right\} \quad (8)$$

Полученные данные необходимо ввести в разработанный программный продукт «MechCut» для получения необходимого усилия N_x (сила N_x – сила, действующая на подвижный нож и приводящая к его деформации, основная сила, которую необходимо компенсировать в процессе проектирования механизма).

Описание программного продукта «MechCut». Разработан программный продукт MechCut, предоставляющий возможность автоматического расчета сил N_x и N_y . В основном диалоговом окне программы возможно введение основных параметров проектируемого механизма, таких как радиус скругления ножа ($r = 0,001 \dots 1$ мм), координата центра скругления ножа, ширина b лезвия ножа, шаг измерения ножа. Также вводятся параметры нитки, для которой разрабатывается механизм обрезки: диаметр нитки и данные, полученные из эксперимента.

Далее в автоматическом режиме строится график зависимости $P = f \varepsilon$, вычисляются коэффициенты, которые выводятся в основном окне программы.

Следующая вкладка программы представляет собой график $P = f \varepsilon$. Точки соединяются линией по методу интерполяции.

На третьей вкладке представлены результаты расчета на основе математического дифференцирования функций [3]:

$$\left. \begin{aligned} dN_x &= \frac{k_1 r}{b} \varepsilon \cos \psi d\psi, & \text{если } 0 \leq \varepsilon \leq \chi; \\ dN_x &= \frac{k_1 r}{b} \varepsilon \cos \psi d\psi + \frac{hr}{b} \cos \psi d\psi, & \text{если } \chi \leq \varepsilon \leq 1; \end{aligned} \right\} \quad (9)$$

$$\left. \begin{aligned} dN_y &= \frac{k_1 r}{b} \varepsilon \sin \psi d\psi, & \text{если } 0 \leq \varepsilon \leq \chi; \\ dN_y &= \frac{k_1 r}{b} \varepsilon \sin \psi d\psi + \frac{hr}{b} \sin \psi d\psi, & \text{если } \chi \leq \varepsilon \leq 1. \end{aligned} \right\} \quad (10)$$

Точки получаются в результате вычислений величин N_x и N_y для соответствующих значений перемещения ножа. Рассчитываются силы N_x и N_y .

Разработка конструктивных решений, обеспечивающих условие гарантированной обрезки нитки

Условие гарантированной обрезки ниток имеет вид:

$$N_x < F,$$

где $F = f \Delta$ – сила взаимодействия подвижного и неподвижного ножа.

Для консольно закрепленного ножа сила F выражается следующим образом:

$$F = \frac{48EI}{l^3} \Delta,$$

где E – модуль упругости материала; I – момент инерции сечения; l – длина консольной части; Δ – величина необходимого натяга ножей.

Для обеспечения гарантированного натяга подвижного и неподвижного ножа механизма автоматической обрезки нитки должно выполняться следующее условие:

$$\sum \Delta_{\text{ув}} - \sum \Delta_{\text{ум}} \geq \Delta ,$$

где $\Delta_{\text{ув}}$ – допуски на размеры увеличивающих звеньев, составляющие узел механизма автоматической обрезки ниток; $\Delta_{\text{ум}}$ – допуски на размеры уменьшающих звеньев, составляющие узел механизма автоматической обрезки ниток.

Оптимизация кинематических и динамических параметров механизма автоматической обрезки ниток

Требуется проанализировать влияние механизма обрезки ниток на диаграмму подачи и потребления игольной и челночной нитки [4].

Отрезки времени t_1, t_2, t_3, t_4 диаграмм по осям абсцисс соответствуют длительностям тактов II, III, IV и V тактограмм, приведенных на рисунке 2.

Время t_2 такта II регламентируется скоростью вращения распределительного вала швейных головок и от шагового электродвигателя не зависит:

$$t_2 = \pi / \omega_{\text{дов}} ,$$

где $\omega_{\text{дов}}$ – угловая скорость доводки главного вала.

Отрезки времени t_1, t_3 и t_4 определяются из формулы (11):

$$t_i = \frac{\Phi_i}{\omega_i} + \frac{\omega_i}{\varepsilon_i} , \quad (11)$$

где $\Phi_{m1}, \Phi_{m3}, \Phi_{m4}$ – углы поворота ротора ШЭД на первом, третьем и четвертом участках соответственно; $\omega_{m1}, \omega_{m3}, \omega_{m4}$ – максимальные значения угловой скорости ротора на участках t_1, t_3, t_4 ; $\varepsilon_{m1}, \varepsilon_{m3}, \varepsilon_{m4}$ – максимальные модули угловых ускорений ротора на участках t_1, t_3, t_4 .

Величина угла определится для текущей фазы из формулы

$$\Phi_i = \frac{2 \sum S_i \cdot U_{\text{общ}}}{d \cdot l_{\text{приводного элемента}}} , \quad (12)$$

где S_1, S_3 – перемещения ползунков 3б при переходе неподвижного ножа (см. рис. 1) из исходного положения в промежуточное и из промежуточного в крайнее правое; $d(l)_{\text{приводного элемента}}$ – диаметр или длина приводного элемента; $U_{\text{общ}}$ – общее передаточное число механизма.

Обозначим $2 \sum S_i / d(l)_{\text{приводного элемента}} = \Psi_i$.

Тогда формула (10) примет вид:

$$t_i = \frac{\Psi_{\text{общ}} \cdot U_{\text{общ}}}{\omega_i} + \frac{\omega_i}{\varepsilon_i} . \quad (13)$$

Поставим задачу определения таких значений $\omega_{m1}, \omega_{m3}, \omega_{m4}, \varepsilon_{m1}, \varepsilon_{m3}, \varepsilon_{m4}, U_{\text{общ}}$, при которых сумма $(t_1 + t_3 + t_4)$ была бы минимальной, и при этом выполнялись бы ограничения:

$$M_{\text{д}} \geq M_{\text{ср1}} + I_{\text{пр}} \cdot \varepsilon_i , \quad (14)$$

где $M_{\text{д}}$ – момент на валу шагового электродвигателя; $M_{\text{ср1}}, M_{\text{ср3}}, M_{\text{ср4}}$ – приведенные к валу ШЭД моменты сил сопротивления; $I_{\text{пр}}$ – приведенный момент инерции масс электропривода.

Для решения поставленной задачи необходимо минимизировать нелинейную целевую функцию

$$\sum t = \sum \frac{\Psi_i \cdot U_{\text{общ}}}{\omega_i} + \sum \frac{\omega_i}{\varepsilon_i} \quad (15)$$

с учетом ограничений (14).

Поставленная задача решена методами нелинейного программирования, для чего составлена программа MechCut2.

Заключение. В результате проведенного исследования разработана методика проектирования механизмов автоматической обрезки ниток, включающая в себя:

- составление исходных требований на проектирование нового механизма;
- выбор структуры;
- разработку схемы;
- расчет технологических параметров механизма;
- экспериментальное исследование зависимости силы, действующей на подвижный нож от относительной деформации нитки;
- программный продукт, рассчитывающий по заданным параметрам величину силы, которая возникает в процессе резания швейной нитки;
- разработку требований для конструктивных решений, обеспечивающих гарантированную обрезку;
- реализацию конструктивных решений;
- оптимизацию кинематических и динамических параметров механизма автоматической обрезки ниток.

Разработанная методика позволяет спроектировать механизм автоматической обрезки ниток с приводом от шагового электропривода и оптимизировать кинематические и динамические параметры шагового привода механизма автоматической обрезки, применение которой делает возможным повысить производительность вышивания за счет снижения временных затрат на обрезку, минимизировать длины остатков обрезанных ниток без ухудшения качества обрабатываемых изделий.

ЛИТЕРАТУРА

1. Краснер, С.Ю. Классификация механизмов обрезки нитки по фазе обрезки / С.Ю. Краснер // Сб. тез. докл. XLII науч.-техн. конф. преподавателей и студентов; УО «ВГТУ»; гл. ред. В.В. Пятов. – Витебск, 2010. – С. 169.
2. Механизм обрезки на многоголовочном вышивальном полуавтомате: пат. 1927 Респ. Беларусь: МПК7 D 05 B 65/00 / Б.С. Сункуев, С.Ю. Краснер, И.Л. Шнейвайс, А.П. Давыдько, О.В. Дервояд; заявитель и патентообладатель УО «ВГТУ». – № u20040456; заявл. 04.10.04; опубл. 15.03.05 // Афіцыйны бюл. / Нац. цэнтр інтэлектуал. уласнасці. – 2006. – № 2. – С. 170.
3. Краснер, С.Ю. Исследование процесса резания швейных ниток / С.Ю. Краснер, Б.С. Сункуев, А.В. Радкевич // Вестн. Витебск. гос. технолог. ун-та. – 2009. – № 17. – С. 39 – 45.
4. Краснер, С.Ю. Анализ влияния механизма обрезки на диаграмму подачи и потребления игольной и челночной нитки на многоголовочном вышивальном полуавтомате / С.Ю. Краснер, А.С. Ситов // Сб. тез. докл. XXXVIII науч.-техн. конф. преподавателей и студентов / УО «ВГТУ»; гл. ред. С.М. Литовский. – Витебск, 2005. – С. 129.
5. Краснер, С.Ю. Оптимизация параметров процесса обрезки швейных ниток / С.Ю. Краснер, Б.С. Сункуев, А.В. Радкевич // Вестн. Витебск. гос. технолог. ун-та. – 2009. – № 17. – С. 45 – 49.

Поступила 21.06.2012

METHODS OF PROJECTING OF AUTO THREAD CUTTING MECHANISM FOR MULTI-HEAD SEWING SEMI-AUTOMAT WITH MICRO PROCESSOR CONTROL

S. KRASNER, B. SUNKUEV

The methods of projecting of automatic thread cutting mechanisms are developed, which include drawing up the initial requirements to projecting of a new mechanism; structure selection; scheme development; calculation of technological parameters of the mechanism; the experimental study of dependence of the force applying to movable cutter on relative thread deformation; the software, calculating the force emerging in the process of thread cutting under the given parameters; the development of requirements for design solutions, providing guaranteed cutting; the realization of design solutions; the optimization of cinematic and dynamic parameters of automatic thread cutting mechanism.

УДК 624.04

ОБ ОПТИМАЛЬНОМ ПРОЕКТИРОВАНИИ ШАРНИРНО-СТЕРЖНЕВЫХ СИСТЕМ

канд. техн. наук, доц. Л.С. ТУРИЩЕВ
(Полоцкий государственный университет)

Рассматривается аналитическое решение задачи оптимального проектирования произвольной пространственной статически определимой фермы, которая считается линейно-деформируемой системой. Задача решается с учетом ограничений для переменных целевой функции по несущей способности и по жесткости. Считается, что конструкционный материал стержней фермы одинаково сопротивляется растяжению-сжатию. Получена замкнутая формула для определения площадей поперечных стержней фермы, при которых вес фермы принимает минимальное значение.

Важным критерием проектирования инженерной конструкции является её материалоемкость. В инженерной практике решение задачи о минимизации расхода конструкционного материала, как правило, осуществляется численно методами математического программирования и возможно только для каждой конструкции в отдельности. Численное решение задач оптимального проектирования для различных конструкций частного вида рассматривалось рядом авторов. Перечень работ, посвященных численному определению таких задач, приведен в [1; 2].

Рассматривается аналитическое решение задачи отыскания минимального веса произвольной пространственной статически определимой фермы, которая считается линейно-деформируемой системой. Ферма включает в себя s прямолинейных стержней, соединяющих n узлов, в том числе m внутренних узлов и $n-m$ опорных узлов. Число опорных стержней удовлетворяет соотношению

$$s_0 = 3n - s.$$

Внешняя нагрузка, действующая на ферму, представляет собой систему сосредоточенных сил, приложенных к внутренним узлам, и описывается вектором

$$\mathbf{P} = \begin{pmatrix} \mathbf{P}_1 \\ \vdots \\ \mathbf{P}_i \\ \vdots \\ \mathbf{P}_m \end{pmatrix},$$

где $\mathbf{P}_i = \begin{pmatrix} P_{xi} \\ P_{yi} \\ P_{zi} \end{pmatrix}$ – вектор нагрузки в произвольном узле i ($i = 1, \dots, m$). Элементами этого вектора являются

проекции сосредоточенной силы, приложенной к произвольному узлу, на координатные оси.

Обозначим длину k -го стержня l_k , а площадь его поперечного сечения A_k . Тогда при заданных конструкционных материалах стержней и их длинах вес произвольной фермы будет являться функцией, зависящей от площадей поперечных сечений:

$$Q(A_1, \dots, A_s) = \sum_{k=1}^s \gamma_k l_k A_k, \quad (1)$$

где γ_k – удельный вес конструкционного материала k -го стержня фермы. Выражение (1) определяет целевую функцию рассматриваемой фермы, переменными которой являются A_k ($k = 1, \dots, s$).

Ограничения для переменных целевой функции (1) вытекают из двух предельных состояний, которым должны удовлетворять параметры напряженно-деформированного состояния проектируемой фермы – внутренние усилия и перемещения.

Согласно первому предельному состоянию должна быть обеспечена несущая способность конструкции. Отсюда следует, что продольное усилие в произвольном растянутом стержне фермы должно удовлетворять условию вида

$$\frac{N_i}{A_i} \leq R_i,$$

а в произвольном сжатом стержне – условию вида

$$\frac{N_j}{\varphi_j A_j} \leq R_j.$$

Здесь R_i – расчетное сопротивление материала i -го стержня при растяжении; R_j – расчетное сопротивление материала j -го стержня при сжатии; φ_j – коэффициент продольного изгиба j -го сжатого стержня.

Будем считать, что конструкционный материал произвольного стержня фермы одинаково сопротивляется растяжению-сжатию. Кроме того, учитывая шарнирное соединение стержней в узлах, положим коэффициент продольного изгиба для всех сжатых стержней равным 1. Тогда искомые площади поперечных сечений A_k ($k = 1, \dots, s$) должны удовлетворять ограничениям первого вида:

$$\frac{|N_k|}{A_k} \leq R_k. \quad (2)$$

Согласно второму предельному состоянию должна быть обеспечена нормальная эксплуатация конструкции, что прежде всего связано с недопущением возникновения в конструкции чрезмерных перемещений. Условие соблюдения такого предельного состояния имеет вид

$$\Delta \leq [\Delta], \quad (3)$$

где Δ – величина наибольшего перемещения, возникающего в конструкции от внешних воздействий; $[\Delta]$ – предельная величина перемещения, установленная нормами и гарантирующая нормальную эксплуатацию конструкции.

Согласно формуле Максвелла – Мора перемещения, возникающие в ферме при узловой схеме нагружения, описываются следующим выражением:

$$\Delta = \sum_{k=1}^s \frac{n_k N_k l_k}{E_k A_k}. \quad (4)$$

Тогда искомые площади поперечных сечений A_k ($k = 1, \dots, s$) должны удовлетворять ограничению второго вида:

$$\sum_{k=1}^s c_k l_k \frac{1}{A_k} \leq [\Delta], \quad (5)$$

где $c_k = \frac{n_k N_k}{E_k}$ – некоторая константа, характеризующая произвольный k -тый стержень.

Задача отыскания минимума целевой функции (1) с учетом ограничений (2), (5) является задачей нелинейного программирования, так как указанные ограничения зависят от обратных величин переменных целевой функции. При ее решении возможны два случая.

В первом случае минимум целевой функции (1) достигается при значениях переменных, при которых впервые выполняются ограничения (2)

$$A_k = \frac{|N_k|}{R_k} \quad (6)$$

и одновременно выполняются ограничения (5).

Во втором случае при значениях переменных (6) ограничения (5) не выполняются и, следовательно, минимум целевой функции не достигается. Минимум целевой функции в этом случае обычно отыскивается численно одним из методов математического программирования, например методом динамического программирования. Алгоритм численного решения задачи этим методом изложен в [3].

Для аналитического решения задачи во втором случае введем новые переменные целевой функции:

$$a_k = \frac{1}{A_k}. \quad (7)$$

Тогда задача отыскания минимального веса фермы может быть сформулирована следующим образом.

Требуется минимизировать целевую функцию

$$Q(a_1, \dots, a_s) = \sum_{k=1}^s \gamma_k l_k a_k^{-1}, \quad (8)$$

при соблюдении условия

$$\sum_{j=1}^s c_j l_j a_j = [\Delta] \quad (9)$$

и

$$a_j < \frac{R_j}{|N_j|}. \quad (10)$$

Условие (9) получено из ограничения (5) и соответствует значениям переменных целевой функции (8), при которых ограничение (5) выполняется впервые.

Для отыскания минимума функции (8) применим метод множителей Лагранжа. Для этого запишем условие (9) в виде

$$\sum_{j=1}^s c_j l_j a_j - [\Delta] = 0$$

и преобразуем целевую функцию (8) к эквивалентному расширенному виду:

$$F(a_1, \dots, a_s, \lambda) = \sum_{k=1}^s \gamma_k l_k a_k^{-1} + \lambda (\sum_{j=1}^s c_j l_j a_j - [\Delta]), \quad (11)$$

где λ – множитель Лагранжа.

Запишем условия существования экстремума для функции (11):

$$\frac{\partial F}{\partial a_k} = -\gamma_k l_k \frac{1}{a_k^2} + \lambda c_k l_k = 0; \quad (12)$$

$$\frac{\partial F}{\partial \lambda} = \sum_{j=1}^s c_j l_j a_j - [\Delta] = 0. \quad (13)$$

Найдем из (12)

$$a_k = \frac{1}{\sqrt{\lambda}} \sqrt{\frac{\gamma_k}{c_k}}, \quad (14)$$

а из (13) с учетом (14) получим

$$\frac{1}{\sqrt{\lambda}} = \frac{[\Delta]}{\sum_{j=1}^s l_j \sqrt{c_j}}. \quad (15)$$

Тогда формула для определения площадей поперечных сечений A_k ($k = 1, \dots, s$) стержней фермы, при которых целевая функция (8) принимает минимальное значение, имеет вид

$$A_k = \sqrt{\frac{c_k}{\gamma_k} \frac{\sum_{j=1}^s l_j \sqrt{c_j}}{[\Delta]}}.$$

ЛИТЕРАТУРА

1. Сергеев, И.Д. Проблемы оптимального проектирования конструкций / И.Д. Сергеев, А.И. Богатырев. – Л.: Стройиздат, 1971.
2. Мажид, К.И. Оптимальное проектирование конструкций / К.И. Мажид. – М.: Высш. шк., 1979.
3. Почтман, Ю.М. Динамическое программирование в задачах строительной механики / Ю.М. Почтман, В.А. Бараненко. – М. Стройиздат, 1975.

Поступила 29.06.2012

OPTIMAL DESIGN OF HINGE-BAR SYSTEMS

L. TOURISCHEV

The article deals with an analytical solution to the problem of optimal design of an arbitrary spatial statically determinate truss, which is considered to be a linearly deformable system. The problem is solved subject to the restrictions for the variables of the objective function of the bearing capacity and rigidity. It is believed that the constructional material of farm rods is equally resistant to tension-compression. A closed formula for determining the area of the transverse farm rods, where the weight of the farm takes its minimum value, has been obtained.

УДК 532.613

ИЗЛУЧАТЕЛЬ ДЛЯ ЛУЧЕВОЙ КАМЕРЫ СВЧ-НАГРЕВА И СУШКИ МАТЕРИАЛОВ

*канд. техн. наук, доц. А.Л. АДАМОВИЧ, канд. техн. наук, доц. Ю.Г. ГРОЗБЕРГ,
Ю.В. МАТЕЛЕНКО, О.А. КИЗИНА, Т.А. БУЛЬБЕНКОВА
(Полоцкий государственный университет)*

На основе компьютерного моделирования проведены расчет и оптимизация параметров излучателей в виде щели в торце волновода с экраном, предназначенным для работы на рабочих частотах бытовых магнетронов 2,45 и 2,465 ГГц в лучевых СВЧ-камерах нагрева и сушки материалов. Проведено компьютерное моделирование распределения СВЧ-поля от излучателя в зависимости от смещения и конечных размеров экрана. Приведены данные для выбора расстояний между соседними излучателями в камерах с многомагнетронным возбуждением для достижения приемлемой равномерности распределения СВЧ-поля в материале. Продемонстрированы результаты измерения КСВН излучателя, выполнена оценка нагрева излучателя поверхностными токами при его работе в камере. Представлены тепловизионные снимки СВЧ-нагрева влажных досок в камере при облучении одним и двумя излучателями.

Введение. Известно применение рупорных, резонансных и нерезонансных волноводно-щелевых антенн для ввода и распределения СВЧ-энергии в лучевых установках СВЧ-нагрева и сушки материалов. Их конструктивный расчет хорошо разработан и приведен в литературе, отражающей вопросы по антенной технике [1 – 4].

Рупорные антенны для СВЧ-камер просты по конструкции, могут объединяться в одно- двухмерные излучающие решетки и имеют приемлемое согласование с генератором в широком диапазоне частот. Недостатками рупорных антенн являются: ограниченная величина углов раскрытия в Е-плоскости; необходимость увеличения длины рупора при увеличении площади апертуры; неполное согласование с генератором, обусловленное отражением поля от краев раскрытия рупора; попадание вторичных волн, отраженных от материала в тракте генератора вследствие большой площади апертуры рупора.

Резонансные волноводно-щелевые излучатели не так подвержены влиянию вторичных волн, образуют плоский фронт волны вдоль излучателя, также позволяют создавать одно- и двухмерные излучающие решетки, имеют коэффициент стоячей волны по напряжению (КСВН), равный единице на резонансной частоте. Однако при этом согласуются с генератором в узком диапазоне частот, критичны к частоте питающего генератора и требуют обеспечения высокой точности изготовления волновода, размеров щелей и их размещения, причем с увеличением длины антенны требования к точности повышаются. Нерезонансные волноводно-щелевые излучатели не так требовательны к точности изготовления, имеют приемлемое согласование в широком диапазоне частот, однако имеют 15...20 % потери мощности в оконечной поглощающей нагрузке. Кроме того, при установке волноводно-щелевых антенн в камеру и соединении их с СВЧ-генератором могут потребоваться различные Е- и Н-изгибы.

Наиболее простыми по конструкции и изготовлению являются известные в литературе излучатели в виде одиночной щели, прорезанной в торце прямоугольного волновода. При определенных размерах волновода и щели эти излучатели идеально согласуются с генератором на рабочей частоте и являются узкополосными. Такими излучателями могут быть оснащены СВЧ-камеры с многомагнетронным возбуждением на недорогих бытовых магнетронах.

Целью данной работы является расчет и оптимизация характеристик излучателя, настроенного на работу с бытовыми магнетронами, определение параметров возбуждаемого им СВЧ-поля, определение расстояния между излучателями при создании камеры многоэлементного возбуждения.

Расчет оптимальных параметров щели. Рассмотрим излучатель в виде щели шириной $t_{щ}$ и длиной $l_{щ}$, прорезанной в торце прямоугольного волновода сечением $a \times b$, с бесконечным проводящим экраном (рис. 1), находящийся в свободном пространстве.

Требуется определить ширину $t_{щ}$ и длину $l_{щ}$ щели, чтобы достигался минимальный коэффициент отражения S_{11} на рабочей частоте бытовых магнетронов $f_p = 2,45$ ГГц и $f_p = 2,465$ ГГц (длина волны $\lambda = 0,12236$ м и $0,12162$ м соответственно). В расчете принимался волновод стандартного сечения: $a = 90$ мм, $b = 45$ мм, с толщиной стенки 0,5 мм.

Моделирование осуществлялось в программном пакете CST Microwave Studio, предназначенном для численного решения уравнений электродинамики методом конечных разностей. Расчетная сетка имела от 1 до 4,6 млн. ячеек в зависимости от сложности задачи с максимальным размером ячейки в сетке не более $\lambda/10$. Для моделирования использовался персональный компьютер с процессором Intel Core 2 Duo 2,93 ГГц, объемом оперативной памяти 4 Гб и операционной системой Windows 7. Благодаря симмет-

ричности задачи задавались в плоскостях симметрии граничные условия: в плоскости yz равенство нулю тангенциальной магнитной составляющей поля $H_t = 0$, в плоскости xz равенство нулю тангенциальной составляющей поля $E_t = 0$. Предварительно проводилась серия расчетов для определения минимального размера экрана в E -плоскости излучателя, при котором интенсивность отраженных от его границ дифрагмированных волн была минимальна.

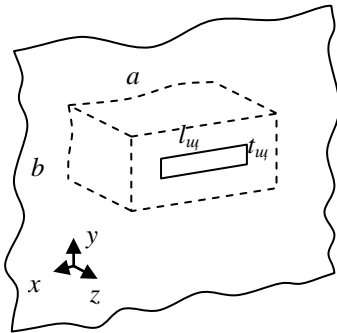


Рис. 1. Излучатель с экраном

Для расчета принимались излучатели со щелями шириной $t_{щ} = 10$ и 5 мм. Длина щелей $l_{щ}$ предварительно задавалась равной $\lambda/2 = 122,36 / 2 \approx 60$ мм, а затем оптимизировалась для достижения минимального коэффициента отражения S_{11} на рабочих частотах $2,45$ и $2,465$ ГГц.

На рисунке 2 для сравнения приведены графики S_{11} в диапазоне частот оптимальных щелей с $t_{щ} = 5$ мм, $l_{щ} = 57,5$ мм и $t_{щ} = 10$ мм, $l_{щ} = 57$ мм, рассчитанных на частоту резонанса $2,45$ ГГц.

Как видно, для более широкой щели обеспечивается несколько большая полоса пропускания в пределах девиации частоты магнетрона ± 50 МГц, обусловленной нестабильным тепловым режимом работы магнетронов и нестабильностью питающего анодного напряжения. Кроме того, более широкая щель имеет больший запас электрической прочности по пробое, что необходимо принимать во внимание, так как излучатели работают в условиях повышенных температур и влажности в СВЧ-сушильных камерах.

В таблице 1 приведены оптимальные параметры излучателя со щелью с $t_{щ} = 10$ мм для двух рабочих частот магнетронов.

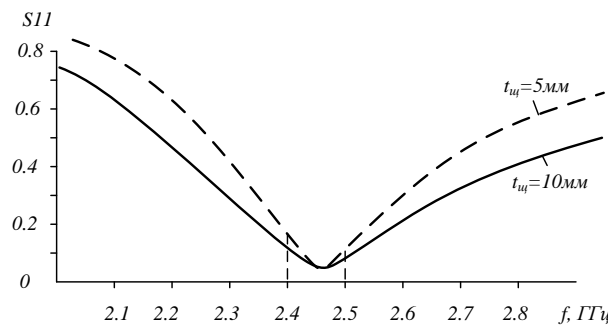


Рис. 2. S_{11} излучателей со щелями шириной 5 и 10 мм

Таблица 1

Расчетные размеры щелей и параметры излучателя на волноводе 90×45 мм

Рабочая частота, ГГц	2,45	2,465
Сечение волновода $a \times b$, мм	90 × 45	
Размеры щели $t_{щ} \times l_{щ}$, мм	10 × 58	10 × 57,5
Значения S_{11} на f_p (в полосе ± 50 МГц от f_p)	0,06 (0,11...0,095)	0,063 (0,1...0,11)

Оценка электрической прочности щели и плотности поверхностных токов. Согласно результатам моделирования расчетная максимальная и минимальная напряженность электрической составляющей возбуждаемого СВЧ-поля в щели $7,1$ кВ/м и $2,5$ кВ/м (рис. 3) при подводимой мощности от генератора P_0 , равной

$$P_0 = \frac{E_0^2 \cdot a \cdot b}{4 \cdot Z_n} = \frac{513^2 \cdot 0,09 \cdot 0,045}{4 \cdot 513} = 0,52 \text{ Вт,}$$

где E_0 – напряженность электрического поля в центре волновода, В/м, равная 513 В/м при напряженности магнитного поля 1 А/м и волновом сопротивлении волновода $Z_n = 376,7 / \sqrt{1 - \lambda / \lambda_{кр}^2} = 513$ Ом с критической длиной волны $\lambda_{кр} = 2 \cdot a = 0,18$ м на частоте $2,45$ ГГц.

При пересчете на $P_0 = 1$ кВт подводимой мощности максимальная и минимальная напряженность поля в щели составит 310 и 110 кВ/м соответственно. Таким образом, при ширине щели 10 мм и пробивном напряжении сухого воздуха при атмосферном давлении 3000 кВ/м [5] обеспечивается запас по электрической прочности почти в 10 раз.

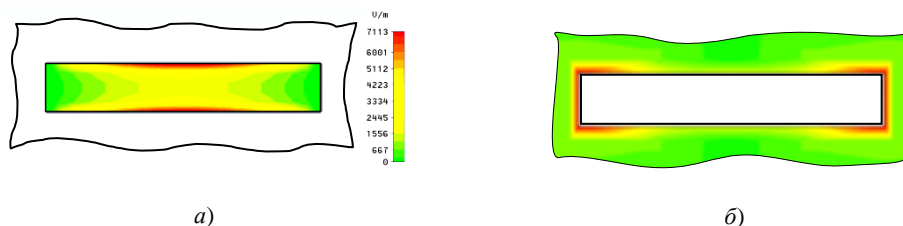


Рис. 3. Распределение напряженности СВЧ-поля в щели (а) поверхностных токов в области щели (б)

Согласно результатам расчетов наибольшая плотность токов наблюдается у коротких сторон щели (см. рис. 3). На этих участках целесообразно нанесение покрытия из металлов с большой проводимостью для устранения нагрева за счет поверхностных токов. Экспериментальная оценка степени нагрева излучателя поверхностными токами при его работе представлена ниже.

Излучатель на волноводе нестандартного сечения. Согласно результатам расчетов, представленных выше, излучатель на волноводе сечения 90×45 мм не обеспечивает полное согласование с генератором на рабочей частоте, при котором КСВН = 1 ($S_{11} = 0$), так как сопротивление щели также зависит и от размеров волновода. Путем проведения серии численных расчетов подбирались такие размеры волновода и длины щели, которые обеспечивают резонанс и нулевое отражение на рабочих частотах 2,45 и 2,465 ГГц. Полученные размеры излучателей для данных частот приведены в таблице 2.

Таблица 2

Оптимальные размеры излучателя и характеристики на нестандартных волноводах

Рабочая частота, ГГц	2,45		2,465	
Размеры волновода $a \times b$, мм	140×45	90×51	136×45	$90 \times 49,5$
Размеры щели $t_{щ} \times l_{щ}$, мм	$10 \times 59,7$	$10 \times 57,3$	$10 \times 59,3$	$10 \times 57,25$
S_{11} на f_p (в диапазоне ± 50 МГц)	0 (0,1... 0,095)	0 (0,098...0,098)	0 (0,11...0,08)	0 (0,11...0,08)

Распределения СВЧ-поля в ближней зоне щелевого излучателя. Расчеты проводились для излучателя на волноводе 90×45 мм со щелью 10×58 мм и рабочей частотой 2,45 ГГц.

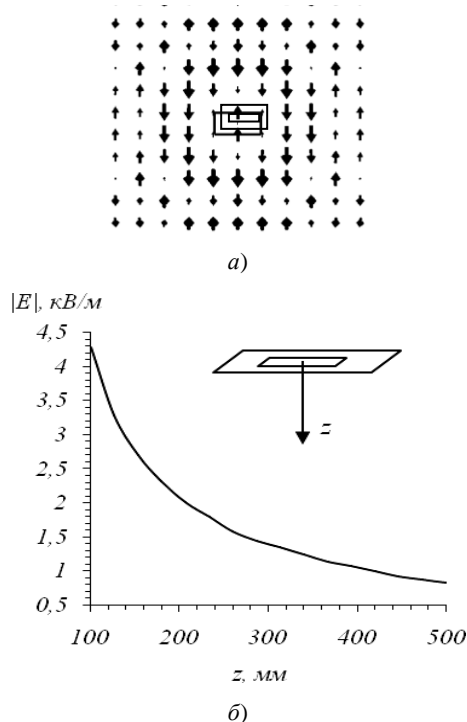


Рис. 4. Мгновенное распределение вектора электрической составляющей СВЧ-поля в ближней зоне излучателя на расстоянии 500 мм (а) и зависимость напряженности поля от расстояния от щели на оси при вводе 1 кВт (б)

Для некоторых задач СВЧ-нагрева, таких как СВЧ-нагрев анизотропных материалов (древесины), ориентация вектора напряженности СВЧ-поля по отношению к обрабатываемому материалу является критичной. Например, при ориентации вектора СВЧ-поля перпендикулярно волокнам древесины достигается большая глубина проникновения в 1,3...1,6 раза по сравнению с продольной ориентацией.

На рисунке 4, а представлено распределение вектора электрической составляющей излучаемого СВЧ-поля на расстоянии 500 мм от излучателя. Как видно, вектор напряженности лежит в Е-плоскости излучателя и перпендикулярен широкой стороне щели.

Для выбора оптимального расстояния от излучателя до материала потребуются знание напряженности поля на разном расстоянии от излучателя.

На рисунке 4, б представлен график значений напряженности поля при удалении от излучателя при мощности генератора 1 кВт.

Влияние смещения s (рис. 5) экрана от плоскости щели на распределение поля в ближней зоне проиллюстрировано рисунком 6, из которого видно, что смещение s заметно изменяет распределение поля в Е-плоскости излучателя с появлением выраженного бокового излучения.

Распределение поля в Н-плоскости при различных s существенно не различается.

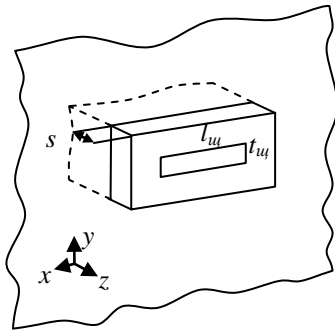


Рис. 5. Излучатель с экраном

Влияние смещения s на согласование излучателя незначительно: при увеличении s происходит незначительное смещение резонанса в сторону низких частот на 20...30 МГц.

Расчеты влияния экрана конечных размеров шириной L в Е-плоскости представлены на рисунке 7. Из рисунка видно, что отраженные от границ экрана диафрагмированные волны накладываются на основную волну щели, в результате чего картина поля становится неоднородной и диаграмма имеет изрезанность. Размеры экрана в Н-плоскости практически не влияют на распределение поля.

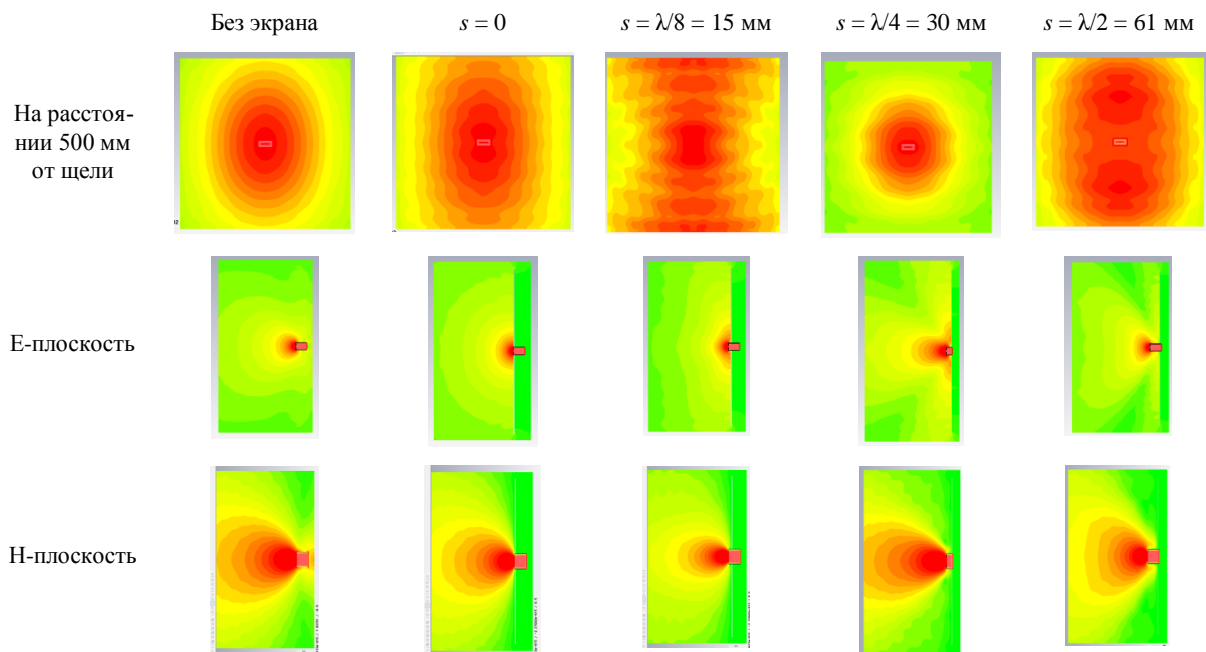


Рис. 6. Распределение СВЧ-поля в ближней зоне щелевого излучателя в 3-х плоскостях при различных s

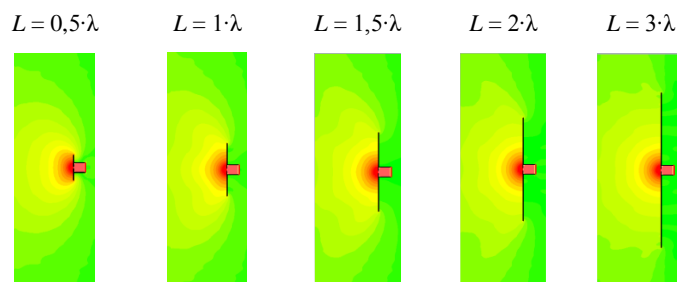


Рис. 7. Распределение напряженности электрической компоненты СВЧ-поля в ближней зоне излучателя в Е-плоскости с экраном конечных размеров

Выбор расстояний между излучателями в Е- и Н-плоскостях в камерах с многомагнетронной системой вода СВЧ-энергии. В таблице 3 представлены результаты моделирования, показывающие расстояние от излучателей до обрабатываемого материала R и соответствующие расстояния между излучателями в обеих плоскостях L_E и L_H , при которых обеспечивается перекрытие соседних излучений по уровню 0,707 напряженности электрического поля.

Из практических соображений для удобства выбора расстояний между излучателями данные, указанные в таблице 3, представлены в виде графиков на рисунке 8.

Таблица 3

Расстояния между излучателями в зависимости от расстояния до обрабатываемого материала

Расстояние до материала R , мм	200	300	400	500	600	700	800	900	1000
Расстояние между излучателями: - в Е-плоскости L_E , мм	420	600	800	1020	1260	1430	1610	1880	2100
- в Н-плоскости L_H , мм	245	360	490	600	720	860	930	1090	1170

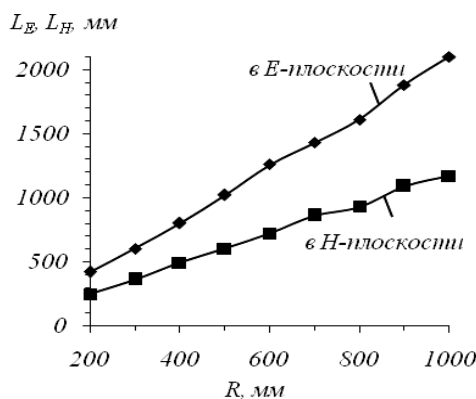


Рис. 8. Зависимость расстояний L_E и L_H между излучателями в обеих плоскостях от расстояния R до обрабатываемого материала, при которых достигается необходимое перекрытие полей соседних излучателей

При указанном расположении излучателей и расстоянии от них до материала будет обеспечиваться однородное температурное поле на поверхности материала при работе соседних излучателей. Однако приемлемая равномерность будет достигаться при попеременном включении генераторов соседних излучателей. При их одновременной работе будет возникать интерференция их полей с образованием участков максимумов и минимумов нагрева.

Для примера на рисунке 9 приведены результаты расчетов нагрева в течение 1000 с пластины в СВЧ-поле двух излучателей в Н-плоскости и Е-плоскости. Расчет проводился для случаев СВЧ-нагрева с попеременным включением генераторов с периодом 100 с и при одновременной работе на частоте 2,45 ГГц обоих генераторов. Параметры материала принимались произвольно: удельная теплоемкость $C_p = 3000$ Дж/(кг·К); плотность $\rho = 1000$ кг/м³; теплопроводность $\lambda = 0,2$ Вт/(м·К); диэлектрическая проницаемость $\epsilon = 1 - j0,05$; коэффициент теплообмена $\alpha = 0$.

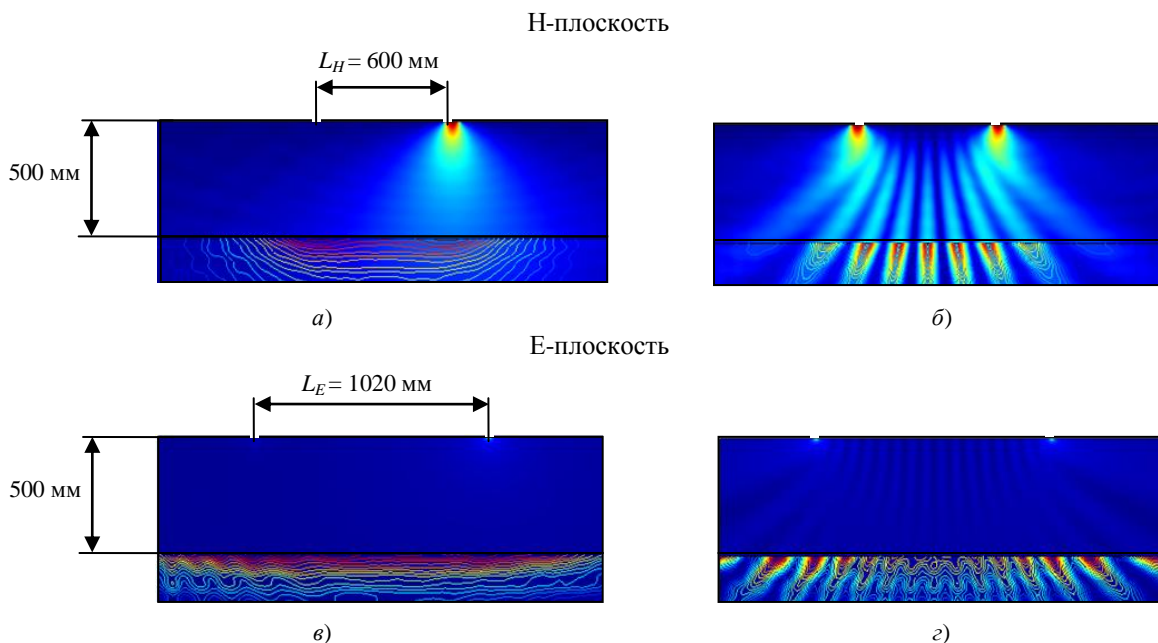


Рис. 9. Распределение температуры в материале от излучателей, установленных в Н-плоскости (а, б) и Е-плоскости (в, г) при попеременной работе магнетронов (а, в) и одновременном включении магнетронов (б, г)

Однако за счет того, что магнетроны работают не строго на одинаковых частотах, и наличия некоторой девиации частоты при работе магнетронов следует ожидать некоторого смещения зон максимумов вдоль материала с выравниванием теплового поля и снижением неравномерности нагрева.

Расчет работы излучателей проведен без учета отражений поля от боковых стенок камеры.

В Е-плоскости излучение щели происходит во всех направлениях, в том числе в направлении боковых стенок, от которых волна отражается в направлении щели. Для уменьшения влияния обратной волны целесообразно выбирать такие размеры камеры и размещение излучателей, чтобы расстояние между боковой стенкой камеры и щелью излучателя было кратно половине длине волны (рис. 10, а):

$$L' = n \cdot \lambda / 2, \quad n - \text{целое число.}$$

Отраженные от боковых стенок камеры волны оказывают большое влияние на распределение СВЧ-поля в камере и тепловой мощности в материале. В связи с этим целесообразно в зоне боковых стенок в Е-плоскости камеры располагать материал, как показано на рисунке 10, б).

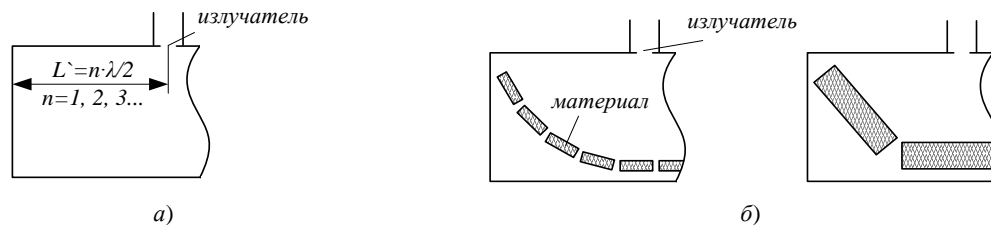


Рис. 10. К выбору расстояния между стенкой и излучателем (а) и возможное расположение нагреваемого материала в камере в Е-плоскости излучателя (б)

При падении волны на материал неизбежно будут возникать отраженные волны, которые, отразившись от стенок камеры, будут интерферировать с прямой волной излучателя и влиять на распределение тепловой мощности в материале. Значение степени отражения зависит от диэлектрической проницаемости материала, геометрии его поверхности и расположения относительно вектора падающего поля и для влажных материалов может достигать существенных значений.

В качестве примера на рисунке 11 приведены зависимости коэффициента отражения R СВЧ-поля от поверхности пластины из сырой древесины при различных ее влагосодержании и температуре для перпендикулярной (R_{\perp}) и параллельной (R_{\parallel}) ориентации вектора падающего поля относительно волокон древесины. Значения комплексной диэлектрической проницаемости ϵ древесины, взятые для расчета R , определялись по выражениям, полученным в [6].

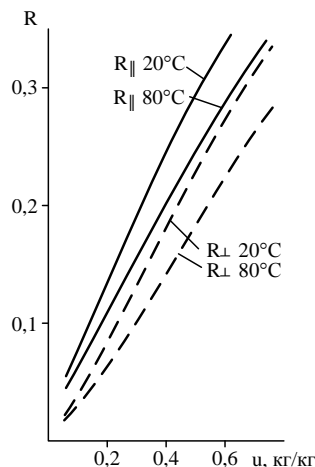


Рис. 11. Зависимость коэффициента отражения падающей СВЧ-волны на пластину из древесины от ее влагосодержания и температуры

Видно, что для более влажной древесины значения R выше. Так, при температуре пластины 20°C с влагосодержанием, равным $0,6 \text{ кг/кг}$, и перпендикулярной ориентации вектора поля R составит $0,25$, или по мощности 6% . При более высоких температурах R меньше, что связано с уменьшением значений ϵ воды, содержащейся в древесине, при увеличении температуры. При перпендикулярной ориентации

вектора поля относительно волокон древесины R также меньше, чем при параллельной ориентации. Поэтому для минимизации явлений интерференции и улучшения равномерности распределения поля СВЧ-сушку пиломатериалов целесообразно проводить при перпендикулярной ориентации СВЧ-поля и больших температурах.

Экспериментальные исследования. Были изготовлены щелевые излучатели из листовой оцинкованной стали толщиной 0,5 мм для волновода 90×45 мм и размерами щели $10 \times 57,5$ мм для работы с магнетроном OM75P мощностью 1 кВт и $f_p = 2,465$ ГГц. Измеренный КСВН излучателя при помощи волноводной измерительной линии на частоте 2,465 ГГц составил 1,22 ($S_{11} \approx 0,1$), что хорошо согласуется с численными расчетами.

Данные излучатели встраивались в верхнюю стенку прямоугольной СВЧ-камеры с размерами $70 \times 70 \times 120$ см (рис. 12).

Для оценки нагрева излучателя поверхностными токами проводился пробный СВЧ-нагрев воды в емкостях, расположенных на поддоне под излучателем. Измерение температуры осуществлялось тепловизором Flir ThermaCAM E300 каждые 2 минуты при выключенном генераторе до достижения установившегося температурного распределения. После 20 минут работы излучателя его температура составила 50°C и больше не повышалась.



Рис. 12. Внешний вид излучателя в СВЧ-камере

Проводились исследования СВЧ-нагрева влажных досок в поле одного излучателя. Доски толщиной 3 см и длиной 50 см с влажностью 60...80 % были уложены над металлическим поддоном на диэлектрических прокладках толщиной $\lambda/4 = 3$ см. Расположение досок в камере соответствовало перпендикулярной ориентации волокон досок вектору напряженности электрической составляющей СВЧ-поля, возбуждаемого щелью. На рисунке 13 представлены тепловизионные снимки СВЧ-нагрева досок в течение 10 мин при их расположении на расстоянии 16 см (рис. 13, а) от излучателя и в течение 10 и 20 мин на расстоянии 32 см от излучателя (рис. 13 б, в).

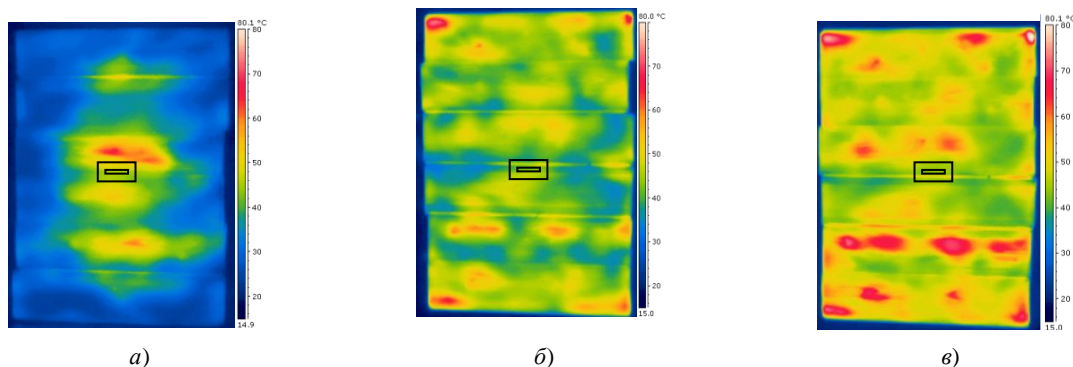


Рис. 13. Тепловизионные снимки:

- а – после 10 минут СВЧ-нагрева досок на расстоянии 16 мм от излучателя;
 б – после 10 минут нагрева досок на расстоянии 32 см, в) после 20 минут нагрева досок на расстоянии 32 см.
 (прямоугольником показано расположение излучателя и щели)

Как видно, на термограммах присутствуют области повышенного нагрева, обусловленные интерференцией прямой волны излучателя и вторичных волн, отраженных от поверхности досок и стенок камеры.

На рисунке 14 представлено распределение температуры на поверхности досок после их 15 минутного нагрева в СВЧ-поле двух излучателей, работающих одновременно. Доски располагались на расстоянии 30 см от излучателей.

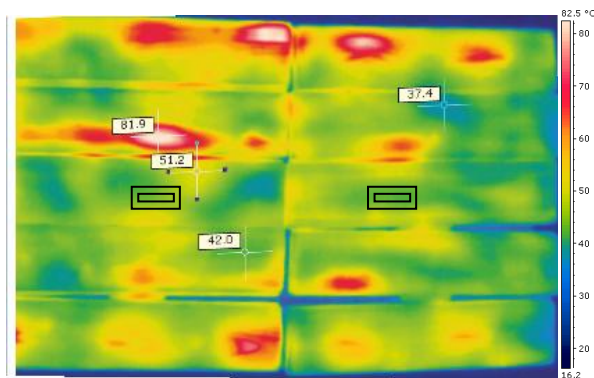


Рис. 14. Распределение теплового поля на поверхности досок после 15 минутного нагрева СВЧ-полем в камере с двумя излучателями

Заключение. Для камер СВЧ-нагрева предложены простые по конструкции и изготовлению излучатели в виде одиночной щели в торце прямоугольного волновода, которые хорошо согласуются с генератором. В частности, для термообработки энергией СВЧ-поля частотой 2,45 и 2,645 ГГц с применением бытовых магнетронов можно рекомендовать излучатели на стандартном волноводе 90×45 мм или нестандартных волноводах со щелями в торце, размеры и расчетные параметры которых приведены в таблицах 1 и 2. Согласно экспериментальным данным, излучатели обладают малым самонагревом поверхностными токами даже без применения покрытия высокопроводящими металлами, а также обладают большим запасом по пробивной напряженности поля.

Излучатели позволяют создавать одно- и двухмерные антенные решетки для увеличения площади и мощности облучения. Определение расстояний между излучателями, устанавливаемыми в камере, при заданном расстоянии до обрабатываемого материала можно производить по рисунку 8.

ЛИТЕРАТУРА

1. Кочержевский, Г.Н. Антенно-фидерные устройства / Г.Н. Кочержевский, Г.А. Ерохин, Н.Д. Козырев. – М.: Радио и связь, 1989. – 352 с.
2. Антенны и устройства СВЧ / под ред. Д.И. Воскресенского. – М.: Сов. радио, 1972. – 320 с.
3. Жук, М.С. Проектирование антенно-фидерных устройств / М.С. Жук, Ю.Е. Молочков. – М.-Л.: Энергия, 1966. – 648 с.
4. Айзенберг, Г.З. Антенны ультракоротких волн / Г.З. Айзенберг. – М.: Радио и связь, 1957. – 699 с.
5. Куртенков, Г.Е. Основы проектирования изоляции высоковольтного оборудования / Г.Е. Куртенков. – Томск: ИНТЛ, 1999. – 276 с.
6. Адамович, А.Л. Определение комплексной диэлектрической проницаемости древесины в СВЧ-диапазоне / А.Л. Адамович // Вестн. Полоц. гос. ун-та. Серия С. Фундаментальные науки. – 2005. – № 10. – С. 37 – 43.

Поступила 12.07.2012

SLOT IRRADIATOR FOR BEAM CHAMBER OF MICROWAVE HEATING AND DRYING OF MATERIALS

A. ADAMOVICH, Y. GROZBERG, Y. MATELENOK, O. KIZINA, T. BULBENKOVA

The computer model-based calculation and parametric optimization of irradiators in a butt slot form with screen that are meant to work at the beam microwave heating and drying of materials chambers with operating frequencies of the domestic magnetrons at 2,45 and 2,465 GHz are carried out. The computer modeling of the microwave field distribution at the distance of the irradiator in condition of screen offset and finite sizes is carried out. The data for choosing of distances between adjacent irradiators at chambers with multimagnetron excitation to reach tolerant uniform of microwave field distribution in a material are cited. Voltage standing-wave ratio (VSWR) of irradiator measurements results are represented, the estimation of irradiator heating by means of surface currents during its operating at the chamber is carried out. Thermal imaging photos of microwave heating of wet lumbers at the chamber during the radiation both by single irradiator and by two irradiators are represented.

УДК 519.85; 004.42; 616.5

МОДЕЛИРОВАНИЕ ЕМКОСТНОГО ДАТЧИКА ВЛАЖНОСТИ КОЖИ

А.М. ВОРОБЕЙ, Д.В. РЫМАРЕВ, канд. техн. наук, доц. М.В. ДАВЫДОВ
(Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники, Минск);
д-р мед. наук, проф. С.С. СТЕБУНОВ
(Республиканский клинический медицинский центр, Минск)

Демонстрируется программно-математическая модель емкостного датчика влажности кожи с помощью программного пакета COMSOL Multiphysics. В результате моделирования построены конфигурации трех емкостных датчиков влажности кожи: «встречно-штыревой», «цилиндрический» и «прямоугольный». Для каждой конфигурации емкостного датчика рассчитаны напряженность электрического поля, глубина проникновения электрического поля, зависимость емкости датчика от изменения относительной влажности эпидермиса. В процессе исследований установлено, что встречно-штыревой датчик влажности кожи обладает наименьшей глубиной проникновения электрического поля (114 мкм), что позволяет исключить влияние более глубоких слоев кожи человека. Также показано, что встречно-штыревой датчик имеет наибольшую чувствительность измерения влажности эпидермиса по сравнению с цилиндрическим и прямоугольным датчиками.

Введение. В последние десятилетия в Республике Беларусь и за рубежом интенсивно исследуется влияние содержания влаги в различных материалах на их свойства. В медицине и косметологии влажность кожи является важным диагностическим показателем, который позволяет как установить состояние эпидермиса, так и выявить состояние организма в целом. Многочисленные лабораторные и клинические исследования показали взаимосвязь изменения влажности кожи и интенсивности потоотделения при сильных болях (стенокардия, инфаркт миокарда), сильной одышке и других патологических состояниях. Измерение влажности кожи и последующая диагностика пациента позволяют судить о наличии тиреотоксикоза и гипогликемии. На основании показаний влажности кожи судят о различных заболеваниях эпидермиса.

Человеческое тело представляет собой крайне сложную систему, и для разработки эффективных датчиков влажности необходимо решить ряд задач: изучение характера распределения и распространения электрического поля в нелинейных неоднородных структурах; исследование влияния технических и технологических аспектов на точность проведенных измерений.

Различным методам измерения влажности в материалах и средах уделено в литературе достаточно много внимания. В то же время практически все методы направлены на измерение влажности в различных отраслях промышленности: в строительстве измерители влажности используются для определения свойств бетона, кирпича, древесины и прочих твердых тел; в пищевой промышленности важным показателем является влажность зерна и бобовых культур [1; 2].

Как показал обзор литературных источников патентных исследований, к настоящему времени известны различные способы измерения влажности кожи [3], имеющие определенные достоинства и недостатки. К примеру, определение относительной влажности кожи с применением ядерного магнитного резонанса дает высокую точность измерения, но сама измерительная система является громоздкой и дорогостоящей, что делает её неприменимой в косметологической практике. Наиболее перспективными являются электрические методы определения влажности кожи: импедансный и емкостной [4].

Емкостные датчики влажности в последнее время становятся всё более распространенными. Они недорогие, просты в эксплуатации, обеспечивают в высокой степени точные показания. Одним из самых известных измерителей влажности кожи емкостным методом является прибор Corneometer CM 825. Это современный высокочувствительный прибор для измерения гидратации кожи [5].

В корнеометрии воплощены последние научные разработки в области диагностики кожи. Метод основан на измерении емкости. Дело в том, что диэлектрическая константа воды равна 81, остальные вещества в большинстве случаев имеют диэлектрическую проницаемость менее 7. Измерение емкости показывает различие данного параметра в разных образцах, в зависимости от содержания воды в этих образцах. Стеклопластиковая пластинка (диэлектрик) изолирует золотую пластинку измерительного электрода от контакта с кожей, что предотвращает прохождение электрического тока. Рассеянное электрическое поле проникает через кожу, что позволяет определять ее диэлектрические свойства. На одном электроде образуется избыток электронов (отрицательный полюс), на другом – остаток электронов (положительный полюс). Создается электрическое поле между электродами, несущими разный заряд. Во время измерения волны проникают в поверхностный эпидермальный слой кожи и определяются его диэлектрические свойства.

Возможности и преимущества корнеометрии заключаются в следующем:

- измерение емкости не влияет на химический состав кожи и электролитный состав веществ, нанесенных на кожу; отсутствует гальванический ток и поляризационные эффекты;
- глубина проникновения электрических волн достоверно мала, что означает оценку влажности именно на поверхности кожи;
- обеспечивается температурная стабильность зонда;
- время измерения очень мало – около 1 с, это предотвращает окклюзию, которая влияет на точность измерений;
- исключается влияние емкости глубоко лежащих тканей;
- изменения параметров питания прибора не влияют на результаты измерений;
- постоянное и малое давление измерительной головки зонда (около 1,6 Н) дает возможность достоверных повторов результатов измерений, без влияния на физиологические функции кожи;
- малый размер измерительной головки дает возможность проводить измерения на всех участках тела (даже на губах, носу, ушах).

Основные методы, описывающие поведение электрического поля в различных системах, базируются на уравнениях в частных производных. Поэтому применение аналитических методов решения (метод конформных преобразований, метод изображений, метод разделения переменных) сопряжено с определенными трудностями или вообще невозможно в силу сложной геометрической конструкции объектов, нелинейности характеристик материалов и других факторов. В этом случае единственными методами решения являются численные методы, в основе которых лежит дискретизация. Уравнение поля в частных производных преобразуется в систему алгебраических уравнений, решение которой дает аппроксимацию поля в дискретных точках пространства.

Метод конечных элементов (МКЭ) [6] – численный метод решения дифференциальных уравнений с частными производными, а также интегральных уравнений, возникающих при решении задач прикладной физики. Выбор МКЭ для решения дифференциальных уравнений в частных производных обусловлен преимуществами данного метода: произвольная форма обрабатываемой области; сетку можно сделать более редкой в тех местах, где особая точность не нужна. В настоящей работе для моделирования емкостного датчика влажности использован программный пакет COMSOL Multiphysics. Это мощная интерактивная среда для моделирования и расчетов большинства научных и инженерных задач, основанных на дифференциальных уравнениях в частных производных методом конечных элементов.

Целью данной работы является разработка программно-математической модели емкостного датчика влажности кожи, позволяющей определять напряженность электрического поля, глубину проникновения электрического поля, а также емкость датчика в зависимости от относительной влажности.

Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие задачи: *создать* геометрию моделей емкостных датчиков влажности кожи, используя программный пакет COMSOL Multiphysics; *определить* для каждой модели емкостного датчика электрические параметры: напряженность электрического поля, глубину проникновения электрического поля, емкость датчика в зависимости от относительной влажности; *проанализировать* полученные данные и обосновать выбор конфигурации датчика для измерения влажности кожи.

Емкостной метод измерения влажности. Основой емкостного метода измерения влажности является изменение диэлектрической проницаемости исследуемого материала (кожи человека) при изменении его относительной влажности. Для среды, состоящей из двух компонентов, диэлектрическая проницаемость зависит от их объемного соотношения и описывается формулой Лихтенеккера – Ротера:

$$\lg \varepsilon_3 = y_1 \lg \varepsilon_1 + y_2 \lg \varepsilon_2, \quad (1)$$

где y_1, y_2 – объемные доли первого и второго компонентов соответственно.

В данных исследованиях диэлектрическая проницаемость сухой кожи (ε_1) принималась равной 7, а диэлектрическая проницаемость воды (ε_2) – 81.

На основании уравнения (1) получена зависимость диэлектрической проницаемости от относительной влажности кожи, представленная на рисунке 1 (сплошная линия). С помощью табличного процессора Microsoft Excel 2010 получена аппроксимированная кривая, обозначенная на рисунке 1 пунктирной линией.

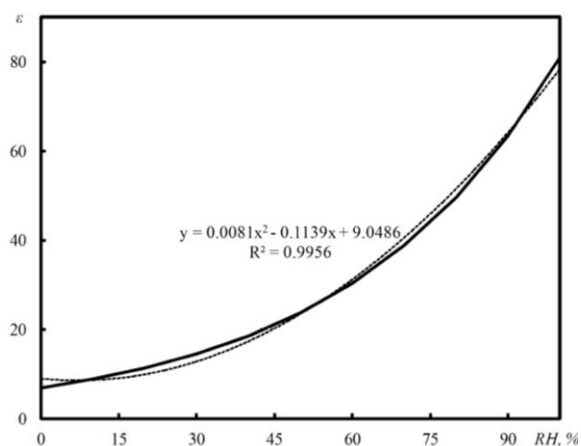


Рис. 1. Зависимость диэлектрической проницаемости от относительной влажности кожи

Моделирование электрического поля. Энергия, требуемая для зарядки конденсатора, должна равняться энергии электростатического поля, которая находится по следующей формуле:

$$W_e = \frac{q^2}{2C}, \quad (2)$$

где W_e – энергия заряженного конденсатора, Дж; q – заряд конденсатора, Кл; C – емкость конденсатора, Ф.

Величина W_e доступна в режиме Electrostatics пакета COMSOL Multiphysics: приложение рассчитывает данное значение путем интегрирования:

$$W_e = \int (D, E) d\Omega, \quad (3)$$

где D – электрическое смещение; E – напряженность электрического поля.

Емкость C является функцией заряда q на двух проводящих обкладках и разности потенциалов ΔV между этими обкладками и определяется по формуле:

$$C = \frac{q}{\Delta V}. \quad (4)$$

Таким образом, расчет емкости C производится из найденной при моделировании энергии заряженного конденсатора W_e и разности потенциалов ΔV на обкладках конденсатора по формуле [7]:

$$C = \frac{2W_e}{\Delta V^2}. \quad (5)$$

Построение геометрии емкостных датчиков. Построение объемных моделей в COMSOL Multiphysics можно осуществить несколькими способами: импорт готовой геометрии из других CAD-пакетов, таких как AutoCAD и SolidWorks; создание геометрии в пакете MATLAB; импорт готовой геометрии, созданной заранее в COMSOL Multiphysics; пошаговое создание геометрии в COMSOL Multiphysics. В данной работе использовано создание модели с помощью встроенных в пакет инструментов [8].

В результате моделирования построены конфигурации трех емкостных датчиков влажности: «встречно-штыревой», «цилиндрический» и «прямоугольный» (рис. 2). Частота сигналов датчиков задана на уровне 10 кГц.

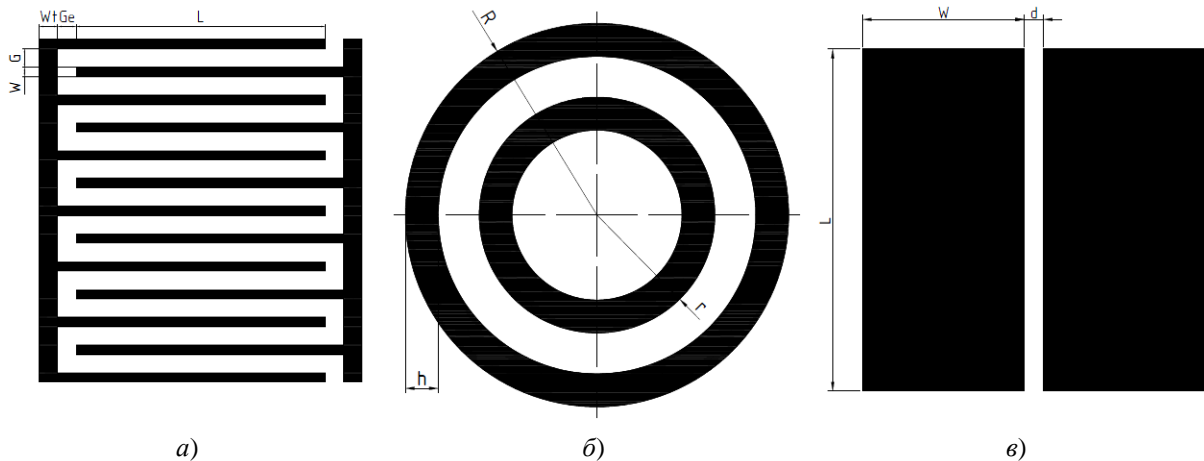


Рис. 2. Модели емкостных датчиков:

- a* – встречно-штыревой датчик (W – ширина плеча в мкм; G – промежуток между плечами; G_e – промежуток между плечом и электродом; L – длина перекрывающейся области; W_e – ширина электрода);
- б* – цилиндрический датчик (r – внутренний радиус в мкм; R – внешний радиус; h – ширина электрода);
- в* – прямоугольный датчик (d – расстояние между электродами; W – ширина; L – длина)

Моделирование электрических параметров емкостных датчиков и анализ результатов. В пакете COMSOL Multiphysics рассчитаны следующие параметры: напряженность электрического поля, глубина проникновения электрического поля, зависимость емкости датчика от изменения относительной влажности эпидермиса.

На рисунке 3 представлено распределение электрического поля для встречно-штыревого, цилиндрического и прямоугольного датчиков.

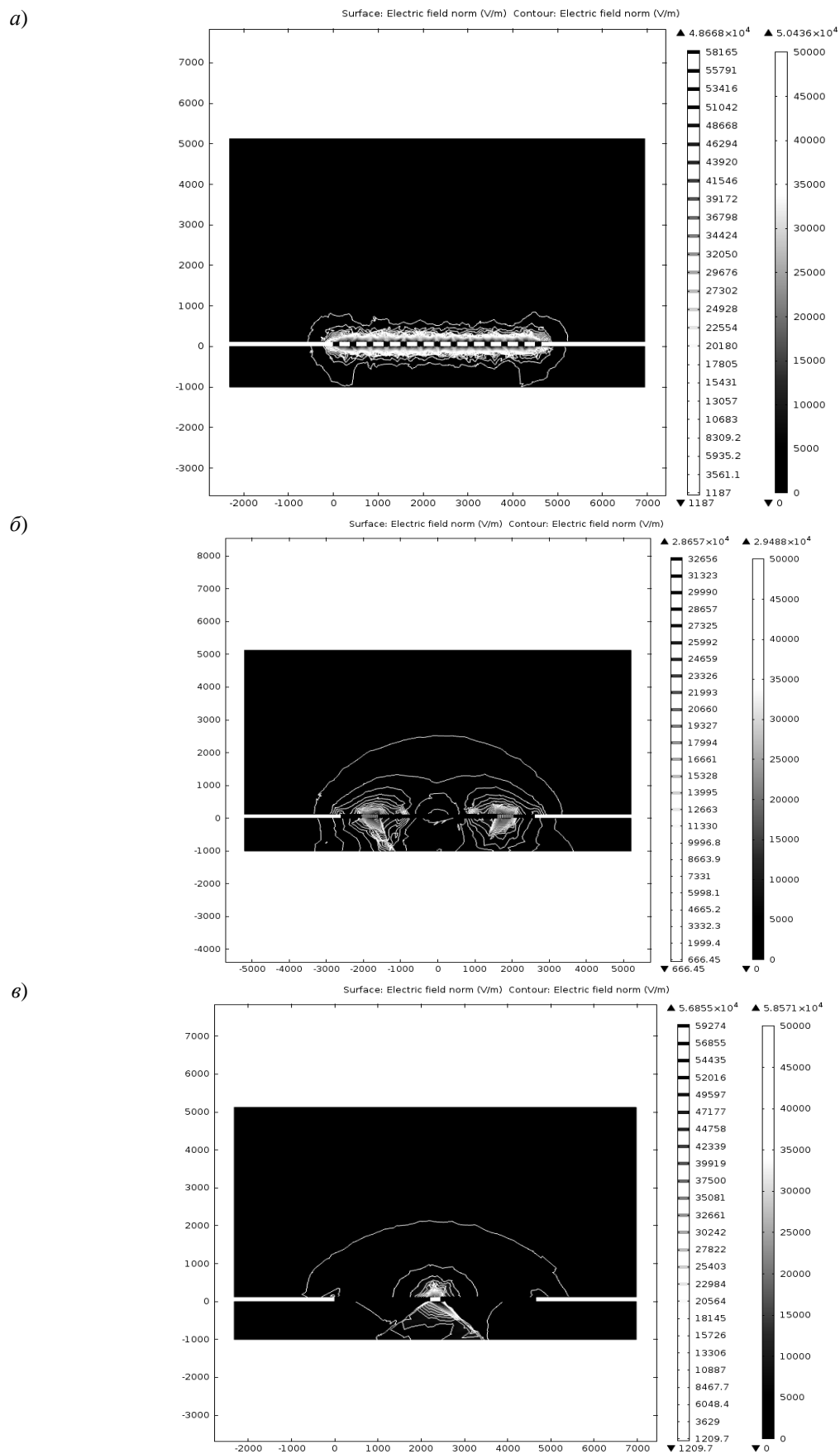


Рис. 3. Распределение электрического поля встречно-штыревого датчика (*a*), цилиндрического датчика (*б*) и прямоугольного датчика (*в*)

Анализируя полученные графики (см. рис. 3, а – в), можно заключить, что встречно-штыревой датчик обладает наиболее равномерным распределением электрического поля в эпидермисе человека.

Емкость рассматриваемых видов датчиков, расстояние от поверхности электродов, на котором напряженность электрического поля падает до нуля, а также глубина проникновения электрического поля представлены в таблице.

Емкость рассматриваемых видов датчиков; расстояние от поверхности электродов, на котором напряженность электрического поля падает до нуля; глубина проникновения электрического поля

Вид датчика	Емкость датчика (при влажности 50 %), пФ	Расстояние от поверхности электродов, на котором напряженность электрического поля падает до нуля, мкм	Глубина проникновения электрического поля (расстояние, на котором напряженность электрического поля уменьшается в e раз), мкм
Встречно-штыревой	6,44	516	114
Цилиндрический	2,41	2355	240
Прямоугольный	2,03	2859	212

Из таблицы видно, что глубина проникновения электрического поля в случае встречно-штыревого датчика является наименьшей (114 мкм), что позволяет избежать влияния глуболежащих тканей на измерение влажности эпидермиса.

График зависимости емкости датчиков от относительной влажности измеряемой среды (кожи) представлен на рисунке 4.

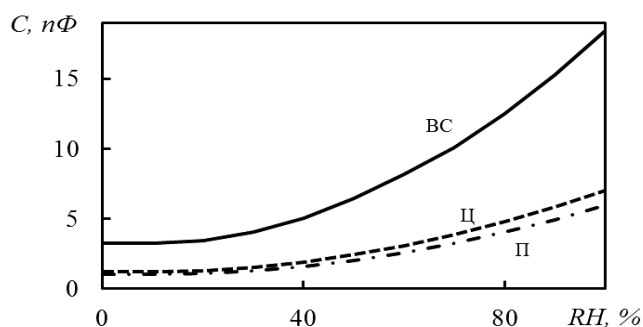


Рис. 4. Зависимость емкости датчиков от относительной влажности:
BC – встречно-штыревой датчик; Ц – цилиндрический датчик; П – прямоугольный датчик

Анализ данных, представленных на графике (см. рис. 4), показал следующее:
- встречно-штыревой датчик обладает наибольшей чувствительностью измерения влажности эпидермиса;

- цилиндрический и прямоугольный – наименьшей, что связано с большей площадью электродов встречно-штыревого датчика.

При одинаковом изменении относительной влажности кожи встречно-штыревой датчик будет показывать большее изменение емкости. Это позволяет повысить точность определения влажности кожи по сравнению с цилиндрическим и прямоугольным датчиками.

Заключение. С помощью программного пакета COMSOL Multiphysics построены модели трех емкостных датчиков влажности кожи: «встречно-штыревой», «цилиндрический» и «прямоугольный».

Для каждой конфигурации емкостного датчика рассчитаны:

- напряженность электрического поля;
- глубина проникновения электрического поля;
- зависимость емкости датчика от изменения относительной влажности эпидермиса.

В результате моделирования установлено:

- наименьшей глубиной проникновения электрического поля (114 мкм) обладает встречно-штыревой датчик влажности кожи, что позволяет исключить влияние более глубоких слоев кожи человека;

- встречно-штыревой датчик обладает наибольшей емкостью при влажности 50 % – 6,44 пФ, что позволяет повысить точность определения влажности кожи по сравнению с цилиндрическим и прямоугольным датчиками.

ЛИТЕРАТУРА

1. Способ и устройство для непрерывного измерения влажности сыпучего продукта: пат. 2154816 RU G01N22/04 / Ханс Тоблер (CH), Рогер Леманн (CH), Роман Мюллер (CH); заявитель и патентообладатель БЮЛЕР АГ, Патентабтайлунг (CH). – № 97121906/09; заявл. 28.03.1996; опубл. 20.08.2000.
2. Емкостной датчик влажности: пат. 2167414 RU G01N27/22 / С.М. Башилов, Е.К. Залядеев, В.Г. Крицкий, В.А. Шапошников, М.Т. Вивсяный, С.В. Волков. – № 99124901/28; заявл. 24.11.99; опубл. 20.05.2001.
3. Воробей, А.М. Методы определения интенсивности потоотделения / А.М. Воробей // Современные проблемы радиотехники и телекоммуникаций «РТ-2011»: материалы 7-й междунар. молодеж. науч.-техн. конф., Севастополь, 2011 г.; науч. ред. Ю.Б. Гимпилевич. – Севастополь: СевНТУ, 2011. – С. 191.
4. Vorobei, A.M. Electrical methods of measuring skin humidity / A.M. Vorobei, D.V. Rymarev // Современные проблемы радиотехники и телекоммуникаций «РТ-2012»: материалы 8-й междунар. молодеж. науч.-техн. конф., Севастополь, 2012 г.; науч. ред. Ю.Б. Гимпилевич. – Севастополь: СевНТУ, 2012. – С. 181.
5. Schulz, S. Messung der Hydratation der Mundschleimhaut mit dem Corneometer CM 820 / S. Schulz, C. Lautenschlager, I. Beyer // Deutsche Zahnärztliche Zeitung. – 2003. – № 58.
6. Норри, Д. Введение в метод конечных элементов / Д. Норри, Ж. де Фриз; пер. с англ. – М.: Мир, 1981. – 304 с.
7. Modeling and fabrication of optimum structure of novel interdigital sensors for food inspection [Электронный ресурс]. – Режим доступа: jnm813.pdf.
8. Designing a Capacitive Sensor using COMSOL. Application Note [Электронный ресурс]. – Режим доступа: ap_AQ.pdf.

Поступила 29.06.2012

MODELLING OF SKIN MOISTURE CAPACITIVE SENSOR

A. VOROBEL, D. RYMAREV, M. DAVYDOV, S. STEBUNOV

A mathematical model of skin moisture capacitive sensor using software environment COMSOL Multiphysics has been developed. As the result of modeling three configurations of skin moisture capacitive sensor (interdigital, cylindrical and rectangular) have been proposed. For each skin moisture capacitive sensor the following parameters were calculated: the electric field, the electric field penetration depth and relative skin humidity dependence of capacitance. The interdigital skin moisture capacitive sensor has the smallest penetration depth of the electric field (114 μm), which eliminates the influence of the deeper layers of human skin. The interdigital sensor has the highest sensibility in measuring humidity of epidermis in comparison with cylindrical and rectangular sensors.

УДК 629.3:531.3:004.94

**РАСЧЕТНОЕ ОПРЕДЕЛЕНИЕ ИНЕРЦИОННЫХ СВОЙСТВ АВТОМОБИЛЯ
ДЛЯ МОДЕЛИРОВАНИЯ ДИНАМИКИ ДВИЖЕНИЯ
В ЗАДАЧАХ УПРАВЛЯЕМОСТИ И УСТОЙЧИВОСТИ**

О.В. ДРОБЫШЕВСКАЯ, А.Н. КОЛЕСНИКОВИЧ, О.В. МАТУШКИНА
(Объединенный институт машиностроения НАН Беларуси, Минск)

Рассмотрены экспериментальные и расчетные методы определения моментов инерции автомобиля. Неточности при оценке осевых моментов инерции автомобиля при моделировании аварийных и экстренных ситуаций (столкновение, торможение, резкие повороты) могут привести к значительным погрешностям результатов моделирования динамики автомобиля. При оценке инерционных параметров автомобиля на стадии проектирования для моделирования его динамики необходимо учитывать не только массу, но и геометрию автомобиля, а также возможные изменения распределения масс и положения центра масс, которые могут возникнуть из-за размещения внутри автомобиля груза или пассажира (пассажира). Приведенные методики на основе несложных эмпирических зависимостей для расчета моментов инерции и положения центра тяжести автомобиля позволяют получить достаточно точные значения параметров и создать адекватные динамические модели автомобилей для моделирования его динамики.

Введение. Необходимость в определении инерционных свойств автомобилей возникает при разработке их динамических моделей для решения ряда прикладных задач, в том числе и при моделировании динамики движения транспортных средств, в задачах управляемости и устойчивости. В процессе разработки динамической модели предполагается в первую очередь выделить его основные массы, которые в своей совокупности будут представлять весь автомобиль. Динамические модели автомобилей представляют собой системы дифференциальных уравнений Лагранжа II рода. Для того чтобы достигнуть адекватности модели реальным физическим образцам, необходимо верно определить параметры динамической модели. Для моделирования динамики движения при исследовании управляемости и устойчивости автомобиля, где характерными режимами его движения являются как криволинейное движение по заданной траектории, так и переходные режимы движения (разгон и торможение), важными параметрами являются его инерционные характеристики. Следовательно, для повышения точности модели необходимо как можно точнее определять не только массу и положение центра масс, а также осевые моменты инерции узлов и автомобиля в целом.

В настоящей работе рассмотрены как экспериментальные методы определения моментов инерции автомобиля в целом и отдельных его узлов, так и расчетные методы, позволяющие произвести оценку моментов инерции при отсутствии возможности измерить данные характеристики напрямую.

Расчет моментов инерции и положения центра масс простых фигур. Как известно, момент инерции – скалярная физическая величина, мера инертности тела во вращательном движении вокруг оси, подобно тому, как масса тела является мерой его инертности в поступательном движении.

И хотя понятие момента инерции вводится при рассмотрении вращения твердого тела, однако следует иметь в виду, что эта величина существует безотносительно к вращению. Каждое тело независимо от того, вращается оно или покоится, обладает инерционными свойствами, подобно тому, как тело обладает массой независимо от того, движется оно или находится в покое.

Известно, что моментом инерции материальной точки относительно некоторой оси называется величина, равная произведению массы материальной точки m на квадрат ее расстояния r до оси [1]:

$$J = mr^2.$$

Для протяженных тел момент инерции определяется как сумма моментов инерции отдельных материальных точек (элементарных масс Δm_i), на которое можно мысленно разбить тело [1]:

$$J = \sum_{i=1}^n \Delta m_i r_i^2, \quad (1)$$

где r_i – расстояние элементарной массы Δm_i до заданной оси.

Момент инерции тела, как видно из определения (1), есть величина аддитивная, т.е. момент инерции тела равен сумме моментов инерции его частей. И в свою очередь момент инерции системы тел равен сумме моментов инерции отдельных тел.

Если вещество в теле распределено непрерывно, то вычисление момента инерции сводится к вычислению интеграла

$$J = \int_m r^2 dm,$$

где r – расстояние от элемента массы dm до оси.

Центр масс (центр инерции) в механике – это геометрическая точка, характеризующая движение тела или системы частиц как целого [4].

Положение центра масс (центра инерции) системы материальных точек в классической механике определяется следующим образом:

$$\vec{r}_c = \frac{\sum_i \vec{r}_i m_i}{\sum_i m_i},$$

где \vec{r}_c – радиус-вектор центра масс; \vec{r}_i – радиус-вектор i -й точки системы; m_i – масса i -й точки.

Для случая непрерывного распределения масс:

$$\vec{r}_c = \frac{1}{M} \int_V \rho(\vec{r}) \vec{r} dV,$$

$$M = \int_V \rho(\vec{r}) dV,$$

где M – суммарная масса системы; V – объём; ρ – плотность.

Расчетные и экспериментальные методы определения моментов инерции. Экспериментальные методы оценки моментов инерции подробно рассмотрены в источнике [2]. Рассмотрим семь наиболее часто используемых способов оценки моментов инерции применительно к автомобилю и его узлам:

1. Метод физического маятника

Момент инерции определяется по периоду малых колебаний физического маятника или по его приведенной длине:

$$J = \frac{T^2}{4\pi^2} mgc;$$

$$J = mcl_{np},$$

где c – расстояние от оси подвеса до центра масс объекта; T – период колебания физического маятника; l_{np} – приведенная длина физического маятника.

Преимущество этого способа заключается в значительно большей точности; кроме того, колебания должны быть не так малы, как при измерении периода.

2. Метод качания двойного маятника

Система двойной маятник является системой с двумя степенями свободы, где испытываемое тело совершает плоское движение в вертикальной плоскости, перпендикулярной осям. Опытным путем определяются периоды обоих главных колебаний маятника:

$$J = mcl \left(\frac{g}{4\pi^2 l} \right)^2 T_1^2 T_2^2 - \text{если } c \text{ известно};$$

$$J = ml^2 \left(\frac{g}{4\pi^2 l} \right)^4 T_1^2 T_2^2 \left(T_1^2 - \frac{4\pi^2 l}{g} \right) \cdot \left(\frac{4\pi^2 l}{g} - T_2^2 \right) - \text{если } c \text{ неизвестно}.$$

3. Метод крутильных колебаний

При оценке момента инерции тела данным методом возможны три способа проведения эксперимента:

1) измерение с эталоном равной массы с известным моментом инерции:

$$J = J_0 \frac{T_2^2}{T_1^2};$$

2) наблюдение колебаний тела и тела с эталоном:

$$J = J_3 \frac{T_2^2}{T_1^2 - T_2^2};$$

3) наблюдение колебаний тела на специальной подставке или захвате:

$$J = J_3 \frac{T_3^2 - T_1^2}{T_2^2 - T_1^2}.$$

4. Колебания нитяных подвесов

Для проведения эксперимента тело подвешивается на подвесе, закрепленном на двух и более нитях. Далее тело выводится из равновесного положения поворотом вокруг центральной оси.

На основе измерения колебаний по формуле получают расчетное значение момента инерции:

$$J = \frac{ma^2}{4\pi^2} T^2 \frac{g}{l}.$$

5. Метод атвудовой машины

Измеряемое тело закрепляют на неподвижной оси и приводят во вращение посредством падающего груза, прикрепленного к нити, намотанной на цилиндр, вращающейся вместе с телом:

$$J = \frac{Pr_1^2}{g} \left(\frac{gt^2}{2h} - 1 \right),$$

где P – вес падающего тела; t – время опускания; h – высота опускания; r_1 – радиус цилиндра.

6. Метод качания тела по плоскости

Данным методом можно определить моменты инерции тел, имеющих цилиндрическую форму или два соосных цилиндрических шипа одинакового диаметра. Определив время, в течение которого тело скатывается по наклонной плоскости, по формулам вычисляется его момент инерции относительно центральной оси, параллельной мгновенной оси вращения. Плоскость может быть и горизонтальной, но к телу в этом случае необходимо приложить постоянную силу:

$$J = \frac{mgr \sin \alpha}{4\pi k} t^2 - md,$$

где r – радиус тела либо цилиндрических шипов; α – угол наклона плоскости; d – длина участка скатывания; t – время скатывания; k – количество оборотов.

7. Определение момента инерции при помощи специальных приборов

Для определения моментов инерции могут быть сконструированы специальные приборы, позволяющие измерить моменты инерции как больших, так и очень малых тел. Это такие приборы, как прибор для измерения моментов инерции с винтом и гайкой (принцип действия основан на сумме моментов, согласно которому количество движения точек системы относительно какой-либо оси остается постоянной, если сумма моментов всех внешних сил системы относительно этой оси равна нулю), прибор для определения момента инерции ударом, прибор для определения момента инерции на весах, прибор для определения момента инерции методом колебаний тела на качающейся платформе и т.д.

Для измерения моментов инерции малых тел используют приборы, определяющие момент инерции по периоду колебаний, когда телу сообщают дополнительные вращающие моменты посредством натяжения нити, намотанной на ось с привязанным к ней грузом. Для измерения моментов инерции очень малых тел используют приборы на основе часовых маятниковых механизмов, в которых исследуемое тело закрепляют специальным образом на маховик часов и исследуют изменения хода часов, создаваемые телом.

Недостатком данных методов, как и всех экспериментальных, является необходимость наличия как самого моделируемого объекта, так и специализированных устройств и приборов. Поэтому на стадии проектирования данные методы недоступны, следовательно, в этих случаях необходимо использовать расчетные методы оценки моментов инерции, которые позволяют с определенной точностью оценить значения инерционных характеристик.

Расчет инерционных свойств основных узлов автомобиля. При расчете инерционных свойств автомобиля принято рассматривать его как сложное тело. Всякую сложную фигуру обычно можно разбить на ряд простейших фигур, моменты инерций которых относительно их центральных осей известны. Применяя формулы переноса осей инерции, можно определить момент инерции сложной фигуры, алгебраически суммируя моменты инерции простых фигур относительно общей оси – центральной оси сложной фигуры.

Автомобиль является примером многомассовой системы (англ. MULTIBODY). При моделировании таких систем объект представляется в виде совокупности масс, связанных между собой кинематическими связями. В зависимости от степени детализации общей модели элементом массы может быть поддресоренная масса, составляющая около 80 % от общей массы автомобиля, и такие элементы, как шестерня главной передачи или сателлит бортового редуктора, масса которых может составлять тысячные доли от массы автомобиля. Но так как этот элемент может являться важным звеном в кинематической схеме, от которого зависит, например, направление передачи крутящего момента в трансмиссии, необходимо учитывать и задавать при моделировании его массоинерционные характеристики. Важным этапом при составлении динамической модели является также приведение массоинерционных характеристик. Более подробно методы приведения масс и моментов инерции динамических моделей рассмотрены в работе [5]. Связи между элементами системы (кинематические, силовые, функциональные) определяют законы их взаимодействия в системе всей модели.

Основная часть. Авторами настоящей работы разработана программа для автоматизации вычислений инерционных свойств простых геометрических тел, из которых могут быть составлены сложные по форме детали и узлы автомобиля. Разработанная программа позволяет в различных сочетаниях исходных данных в зависимости от их наличия задавать и вычислять для каждого тела: объем V ; массу m ; плотность; геометрические характеристики (длина, высота, ширина); координаты центра масс x_0, y_0, z_0 относительно каких-либо плоскостей, связанных с элементом; моменты инерции относительно главных центральных плоскостей I_{xx}, I_{yy}, I_{zz} ; главные моменты инерции I_x, I_y, I_z . На рисунке 1 представлены интерфейсные окна разработанного расчетного модуля.

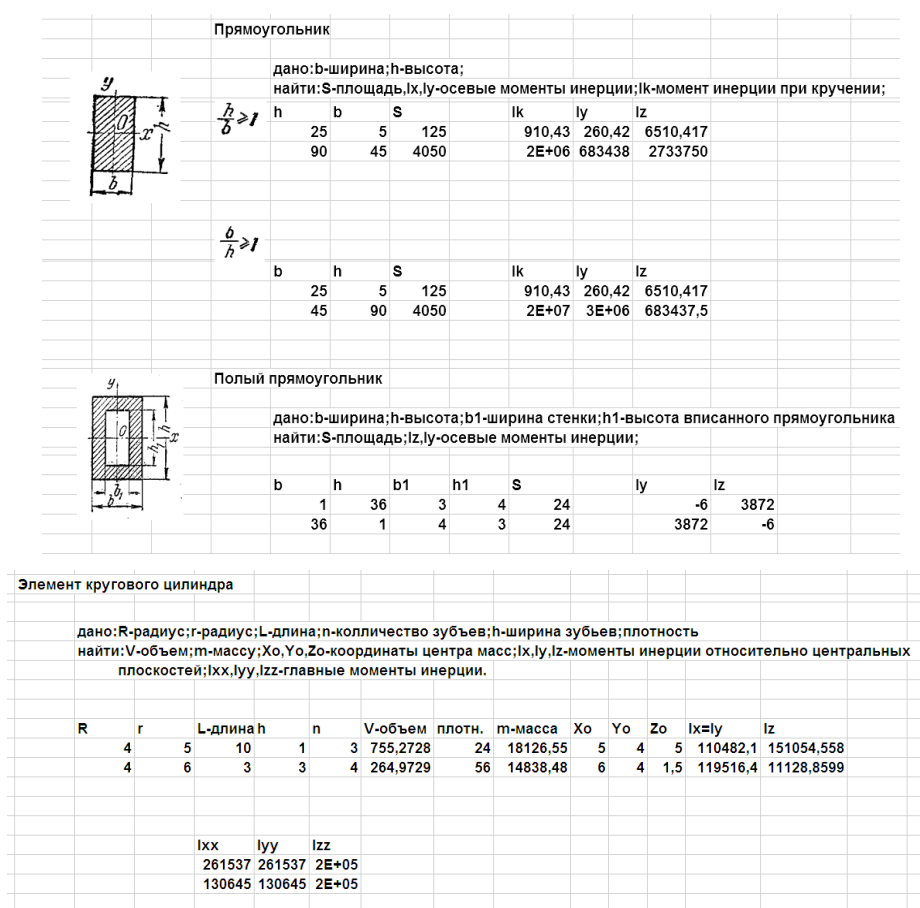


Рис. 1. Примеры интерфейсных окон расчетного модуля

Расчет моментов инерции автомобиля в целом. На рисунках 2 и 3 приведены схематические изображения моделей автомобилей и основных геометрических параметров, используемых для расчета осевых моментов инерции и положения центра тяжести легкового и грузового автомобилей.

Предлагается несколько методов приближенной оценки осевых моментов инерции и положения центра тяжести автомобиля.

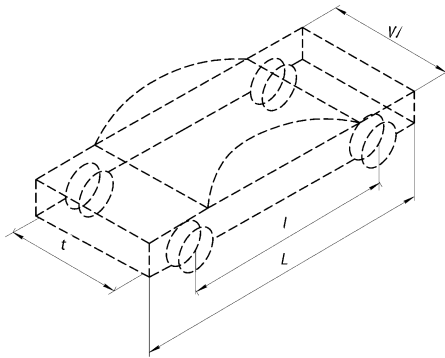


Рис. 2. Геометрические параметры модели легкового автомобиля

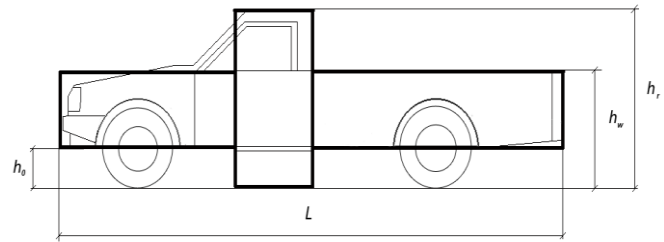


Рис. 3. Геометрические параметры модели грузового автомобиля

Метод оценки момента инерции относительно оси

$$I = tab$$

Этот метод дает удовлетворительные результаты при предположении, что геометрический центр автомобиля совпадает с положением его центра тяжести.

Метод Бурга

$$I_{zz} = 0,1269mL$$

Данная формула получена эмпирически при анализе измеренных значений моментов инерции для 56 моделей европейских автомобилей.

Метод Райде

$$I_{xx} = 0,37m - 86,4, \quad R^2 = 0,893;$$

$$I_{yy} = 2,56m - 1,103, \quad R^2 = 0,919;$$

$$I_{zz} = 2,86m - 1,3154, \quad R^2 = 0,920$$

Наилучшее схождение для моментов инерции автомобилей при вращении, повороте и крене относительно центра масс автомобиля.

Метод Алена

$$I_{zz} = tab \pm 10 \%;$$

$$I_{xx} = \frac{1}{12}m(W^2 + h^2),$$

Метод, предложенный Алленом для оценки осевых моментов, является вариантом метода призмы.

где $h^2 = \alpha_1 h_1^2 + \alpha_2 h_2^2$; $\alpha_1 + \alpha_2 = 1$.

Центр масс:

$$h_{cg} = 0,38h_{roof} \pm 5 \%$$

Метод Гарротта

$$h_{cg} = 0,387h_{roof} \pm 3,5 \%;$$

$$I_{xx} = (0,67 \pm 0,16) \frac{mth}{4};$$

$$I_{yy} = (1,04 \pm 0,22)mab;$$

$$I_{zz} = (1,00 \pm 0,01)I_{yy}$$

На основе анализа сравнения результатов расчетов уже известных формул для осевых моментов инерции и положения центра тяжести и измеренных значений для различных типов автомобилей Гаррот предложил свои уточненные оценочные формулы для определения указанных величин.

Метод Нуна

$$I_{zz} = \frac{mL^2}{12};$$

$$I_{zz} = \frac{ml^2}{4};$$

$$I_{zz} = 2(1-x) \frac{mL^2}{12} + (2x-1)m \frac{l^2}{4}$$

Предложил 3 метода для оценки моментов инерции:

- первый из них предлагает расчет момента инерции как функции от массы и длины автомобиля;
- второй в качестве второго аргумента использует колесную базу;
- третий является комбинацией двух предыдущих методов (x – часть массы автомобиля, приходящаяся на переднюю ось).

В приведенных формулах использованы следующие условные обозначения для физических величин и геометрических параметров автомобиля: I_{xx}, I_{yy}, I_{zz} – осевые моменты инерции; h_{cg} – высота центра масс; L – общая длина автомобиля; l – расстояние между осями автомобиля; h – высота автомобиля; t – осевая база; W – ширина автомобиля; a – расстояние от центра масс до передней оси; b – расстояние от центра масс до задней оси; m – масса автомобиля.

Уточненный расчет моментов инерции узлов и деталей. В работе [3] рассмотрены методы, дающие различную точность оценки осевых моментов инерции, от весьма приблизительных до методов, погрешность которых относительно невелика. Там же даны рекомендации по пересчету осевых моментов инерции и положения центра тяжести в зависимости от вариантов моделирования автомобиля, например, при моделировании автомобиля с пассажирами либо грузом, которые расположены достаточно далеко от центра тяжести. В таких случаях необходимо корректировать соответствующие осевые моменты с учетом этих дополнительных грузов.

В таблице приведены эмпирические зависимости по расчету осевых моментов инерции в зависимости от типа автомобиля.

Расчет осевых моментов инерции основных типов автомобилей

Осевые моменты инерции	Пассажирские автомобили	Мини-вэны	Грузовые автомобили
I_{xx}	$0,1274m(h_{roof} + h_{cg})t \pm 6,5 \%$	$0,1212m(h_{roof} + h_{cg})t \pm 8,0 \%$	$0,66m - 319, R^2 = 0,70$
I_{yy}	$0,1425mL \pm 5,7 \%$	$0,1508mL \pm 7,4 \%$	$3,35m - 2,247, R^2 = 0,70$
I_{zz}	$0,1478mL \pm 4,8 \%$	$0,1525mL \pm 7,4 \%$	$3,08m - 1,821, R^2 = 0,73$
h_{cg}	$0,395h_{roof} \pm 2,6 \%$	$0,381h_{roof} \pm 2,8 \%$	$0,387h_{roof} \pm 3,5 \%$

Заключение. Точность модели и результатов моделирования зачастую определяется заданными исходными данными. Известно, что для динамической модели определение ее инерционных свойств является наиважнейшей задачей, так как использование неточных данных может принципиально изменить поведение и характер движения автомобиля при моделировании его управляемости и устойчивости. При этом, основываясь на неточных данных результатов расчетов, можно дать ошибочные рекомендации по доработке конструкций рулевых управлений и подвесок. Авторами проанализированы экспериментальные и расчетные методы получения инерционных свойств как отдельных узлов, так и всего автомобиля в целом. Приведенные методики на основе несложных эмпирических зависимостей для расчета моментов инерции и положения центра тяжести автомобиля позволяют получить достаточно точные значения параметров, а следовательно, адекватные динамические модели автомобилей для моделирования его движения.

ЛИТЕРАТУРА

1. Фаворин, М.В. Моменты инерции тел: справочник / М.В. Фаворин; под ред. М.М. Гернета. – 2-е изд. – М., 1977. – 512 с.
2. Гернет, М.М. Экспериментальное определение моментов инерции / М.М. Гернет, В.И. Ратобильский. – М.: Машиностроение, 1969. – 247 с.
3. MacInnis, D. Duane, Cliff, E. William, Ising, W. Kurt / Duane, D. MacInnis, William E. Cliff, Kurt W. Ising. A comparison of moment of inertia estimation techniques for vehicle dynamics simulation / International Congress & Exposition, Detroit, Michigan, February 24 – 27, 1997. – P. 99 – 116.
4. Балк, М.Л. Геометрические приложения понятия о центре тяжести / М.Л. Балк. – М.: Физматгиз, 1959. – 232 с.
5. Молибошко, Л.А. Компьютерное моделирование автомобилей: учеб. пособие для студ. спец. «Автомобилестроение» учреждений, обесп. получение высш. образования / Л.А. Молибошко. – Минск: ИВЦ Минфина, 2007. – 280 с.

Поступила 15.05.2012

DETERMINATION OF INERTIAL PROPERTIES OF AN AUTOMOBILE FOR MODELLING OF MOVEMENT DYNAMICS IN TASKS OF CONTROLLABILITY AND STABILITY

O. DROBYSHEVSKAYA, A. KOLESNIKOVICH, O. MATUSHKINA

The article deals with experimental and computational methods for determining the moments of inertia of the vehicle. Inaccuracies in estimating the axial moments of inertia of the vehicle in the simulation of emergency and emergency situations (collision, braking, sharp turns) can lead to significant errors in the results of modeling the dynamics of the car. In evaluating the vehicle inertial parameters at the design stage to simulate its dynamics one must take into account not only mass but also the geometry of the vehicle as well as possible changes in the distribution of mass and center of mass, which may arise due to the location inside the vehicle cargo or passenger(s). These techniques, based on simple empirical dependences for calculation of the moments of inertia and center of gravity of the car allow to obtain fairly accurate values of the parameters and create adequate dynamic models for simulation of vehicle dynamics.

УДК 656.13.05

**ВОПРОСЫ ПЛАНИРОВОЧНОГО РАЗВИТИЯ
И ТРАНСПОРТНЫЕ ПРОБЛЕМЫ ГОРОДА ПОЛОЦКА**

д-р техн. наук, проф. В.П. ИВАНОВ
(Полоцкий государственный университет);
Д.В. МОЗАЛЕВСКИЙ, Н.В. АРТЮШЕВСКАЯ
(Белорусский национальный технический университет, Минск)

Представлены результаты анализа аварийности, условий дорожного движения в городе Полоцке. Даны рекомендации по повышению качества транспортного обслуживания, улучшению планировочных характеристик уличной сети, транспортной планировки узловых пунктов, а также дорожных условий.

За последние 20 лет число автомобилей в Республике Беларусь увеличилось в 4 раза, превысило 3 млн. единиц и продолжает расти. Мы достигли уровня автомобилизации 320 автомобилей на 1000 жителей и постепенно приближаемся к среднеевропейскому уровню, порядка 500 автомобилей на 1000 жителей. Этот рост вызвал ряд проблем, связанных с увеличением нагрузки на УДС, особенно в городах. Снизилась скорость сообщения, ухудшились режимы движения, появились перегрузки, увеличились выбросы в атмосферу и уровень транспортного шума, возросло количество аварий.

Исследованиями, проведенными с участием специалистов Научно-исследовательского центра дорожного движения Белорусского национального технического университета и УП «БелНИИПродостроительства», установлено, что бесспорным лидером по аварийности в Полоцке является ул. Октябрьская, на которой произошло 18 % аварий (76 ДТП/год). Наиболее аварийными на этой улице являются три регулируемых перекрестка с ул. Е. Полоцкой, Гоголя, Пушкина. Основные причины – высокий уровень загрузки (перекресток с ул. Е. Полоцкой); большая интенсивность движения пешеходов в районе железнодорожного и автобусного вокзалов и центрального рынка на ул. Пушкина. На центральном участке ул. Октябрьской существенна доля пешеходов-нарушителей, несмотря на значительную ширину проезжей части и интенсивность транспортных потоков, достигающую 600 авт./ч в каждом направлении. Скорости движения транспортных средств на этом участке имеют значительный «разброс» в связи с интенсивным движением маршрутных транспортных средств, что способствует большому числу опережений, при которых возрастает вероятность наездов на пешеходов, неожиданно появляющихся на полосе движения из-за соседнего транспортного средства, особенно крупногабаритного.

В центральной части города, кроме ул. Октябрьской, наибольшее число ДТП зафиксировано на ул. Гоголя, Коммунистической, Е. Полоцкой, Юбилейной, что связано с наибольшим уровнем интенсивности транспортных потоков. «Очагом» столкновений транспортных средств является квартал, прилегающий к центральному рынку, что связано с недостатком стояночных мест, парковкой на проезжей части улиц Скорины, Пушкина, Юбилейной и маневрированием на ограниченном пространстве. Наиболее сложная ситуация с пропускной способностью в Полоцке сложилась на перекрестке улиц Октябрьской и Е. Полоцкой. Этот перекресток характеризуется самой высокой транспортной нагрузкой (до 2200 авт./ч) и наличием всех разрешенных левых поворотов. Узел выполняет распределительные функции для потоков с трех межсекторных подходов: с двух мостов через р. Полоту (на ул. Октябрьской и ул. Е. Полоцкой) и со стороны железнодорожного переезда через линию Полоцк – Бигосово. Интенсивность трех левоповоротных потоков превышает 120 авт./ч (170 прив. ед./ч). В результате в узле применяется четырехфазная схема светофорного регулирования, значительно снижающая его пропускную способность.

На кольцевом перекрестке Минское – Вильнюсское шоссе – улица Бровки – дорога в д. Экимань наличие пяти подходов и «плотное» размещение трех из них в северо-западной части кольца привело к уменьшению длины зон переплетения потоков и повышению опасности въезда на кольцо со стороны Экимани, которая все отчетливее проявляется с возрастанием интенсивности потоков.

Пересечение улиц Гагарина и Суворова характеризуется отклонением направления главной дороги (ул. Гагарина) в условиях ограниченной видимости из-за опор железнодорожного путепровода, под которым расположен перекресток, и продольного уклона (подъема) на восточном подходе ул. Гагарина.

Кроме того, наличие в 30 м от перекрестка железнодорожного переезда на ул. Суворова приводит к созданию очередей транспортных средств (в том числе маршрутных автобусов), которые выстраиваются до перекрестка Гагарина – Суворова и далее за него.

Пересечение улиц Юбилейной и Кульнева прилегает к мосту через реку Западная Двина и выполняет функцию распределения потоков. Интенсивность левоповоротного потока с моста на ул. Кульнева умеренная (до 50 – 70 авт./ч), однако из-за одной полосы движения на этом подходе транспортные средства, ожидающие возможности поворота налево, регулярно блокируют движение с моста потокам прямого и правоповоротного направлений.

Пересечение улицы Юбилейной и проспекта К. Маркса имеет нестандартную планировку, связанную с наличием двух отдельных проезжих частей и широкой разделительной полосы на западном участке проспекта К. Маркса и одной проезжей части – на восточном участке. Светофорное регулирование в узле при существующей планировке требует сложной схемы организации движения, существенно ограничивающей ее пропускную способность.

Организационно-нормативные мероприятия по развитию улично-дорожной сети. Требуется проведение классификации улично-дорожной сети с определением категории каждой из улиц (характерных участков улиц) для корректного применения требований других нормативных документов (СТБ 1140-99, СТБ 1300-2007 и т. д.), а также реализация требований действующих нормативов по обеспечению необходимого числа стояночных мест возле объектов культурно-развлекательного, научно-образовательного, промышленного, делового и торгового значения.

Планировочное развитие транзитных участков автомобильной дороги Р46 на территории Полоцка. Южный участок автомобильной дороги Р46 на территории Полоцка (Минское шоссе) требует планировочных изменений для исключения нерегулируемых конфликтов между транспортными средствами транзитных потоков с местным движением (транспортом и пешеходами). Для этого необходимо:

- сооружение местного проезда с запада от Минского шоссе с подключением к нему всех выездов из промзоны (кроме основного);
- создание одного регулируемого перекрестка на участке Минского шоссе от путепровода через железную дорогу Полоцк – Крулевщина – Молодечно до кольцевой развязки с Вильнюсским шоссе и улицы П. Бровки (на пересечении с основным выездом из промзоны);
- подключение к регулируемому перекрестку улицы Мариненко и закрытие других проездов между улицей Мариненко и Минским шоссе;
- перенос остановочных пунктов автобусов и пешеходных переходов к регулируемому перекрестку и закрытие всех нерегулируемых переходов на участке.

На кольцевой развязке Минского, Вильнюсского шоссе и улицы Бровки необходимо улучшение условий движения в северо-западной части, особенно для потока транспорта, выезжающего от деревни Экимань. Возможны несколько вариантов планировочных изменений:

- изменение траектории выезда на развязку со стороны д. Экимань с организацией движения по существующему проезду от медгородка до ул. Богдановича, правым поворотом на ул. Богдановича и далее по ней до кольцевой развязки (в обратном направлении движение не изменится), что позволит ликвидировать один из выездов на кольцо и увеличить длину зоны переплетения между соседними оставшимися выездами;
- перепланировка всей развязки с увеличением радиуса центрального островка для удлинения зон переплетения потоков, повышения их пропускной способности и безопасности движения;
- сооружение эстакады по направлению Минское шоссе – улица Богдановича над существующей кольцевой развязкой, что позволит отделить основные потоки транзитного движения от пешеходов и местных транспортных средств, в том числе маршрутных автобусов и маршрутных такси.

Развитие магистральной УДС для увеличения пропускной способности на участках, обеспечивающих транспортные связи между секторами городской территории. Для улучшения транспортного сообщения между секторами Заполотье и Спас-Слобода – Лозовка целесообразно сооружение новой магистральной улицы – продолжения ул. Богдановича на север до ул. Фрунзе с путепроводом над железнодорожной линией Полоцк – Бигосово. Наличие такой магистрали позволит закрыть железнодорожный переезд на ул. Е. Полоцкой и значительно упростить условия движения на загруженном перекрестке ул. Октябрьская – ул. Е. Полоцкой. При устройстве новой улицы следует серьезное внимание уделить планировке перекрестка ул. Зыгина – ул. Богдановича, на котором условия движения существенно усложняются.

Негативным следствием появления нового элемента УДС является увеличение интенсивности движения по ул. Невельской, Грибоедова, 4-му пер. Куйбышева, ул. Слободской, проложенных в мало-

этажной жилой застройке. Однако на указанных улицах расстояние между территориями, занятыми застройкой, позволяет увеличить ширину проезжей части и разместить тротуары. Кроме того, вдоль предлагаемой трассы на отдельных участках имеются незастроенные территории, которые можно использовать для строительства новой улицы.

Расширение моста через р. Полоту на ул. Октябрьской до 4 полос движения не только позволит повысить пропускную способность центрального участка улицы на перспективу, но и обеспечит возможность для корректировки схемы светофорного регулирования на прилегающем перекрестке Октябрьская – Е. Полоцкой с целью снижения издержек движения в этом узле, наиболее загруженном в городе.

Планировочное развитие узловых пунктов магистральной УДС. При проектировании новых узловых пунктов УДС или реконструкции существующих недопустимо принятие планировочных решений для регулируемых перекрестков в одном уровне, которые потребуют применения четырехфазных схем светофорного регулирования (наиболее вероятно появление такой схемы на перекрестке Зыгина – Богдановича при сооружении новой улицы и путепровода в створе ул. Фрунзе). Следует также избегать применения трехфазных схем в узлах с интенсивностью движения на входах более 800 – 900 ед./ч.

На пересечении улиц Октябрьской и Е. Полоцкой в связи с высокой транспортной нагрузкой необходимо обеспечить увеличение пропускной способности. Достижение этой цели возможно изменением схемы светофорного регулирования или планировочными изменениями узла. Возможности для корректировки планировки в указанном узле существенно ограничены геометрическими параметрами прилегающих перегонов и искусственных сооружений на них (мостов через р. Полоту и железнодорожного переезда на ул. Е. Полоцкой). Поэтому устройство дополнительных полос целесообразно только для разделения потоков по направлениям, прежде всего для выделения отдельных полос левоповоротным потокам. Дополнительные полосы необходимы на обоих подходах ул. Е. Полоцкой и на западном подходе ул. Октябрьской, где такая полоса может быть устроена путем продления неиспользуемого заездного «кармана» бывшего остановочного пункта. Остановочные пункты автобусов следует разместить по стандартной нормативной схеме – за перекрестком на всех выходах.

Пересечение улицы Юбилейной и проспекта Маркса, являющееся правобережным предмостовым узлом, необходимо реконструировать с целью наилучшего выполнения функций распределения потоков. Наилучшим вариантом является устройство кольцевого узла, которое значительно облегчит выполнение левых поворотов. При этом центральный островок может иметь форму овала, а его условный центр может быть смещен на запад от условной точки пересечения осей улицы Юбилейной и проспекта Маркса. Для размещения кольцевого узла может быть использована часть территории, в настоящее время занятой стояночной площадкой.

Второй вариант – «разрезанный» кольцевой перекресток с направлением «разреза» вдоль ул. Юбилейной и устройством светофорного регулирования для повышения безопасности пешеходного движения (в первую очередь через ул. Юбилейную).

Пересечение улиц Юбилейной, Дзержинского и Кульнева, являющееся левобережным предмостовым узлом, также необходимо реконструировать с целью наилучшего выполнения функций распределения потоков: *вариант 1* (с минимальными затратами) – расширение подхода к перекрестку со стороны моста для размещения двух полос движения (прямой и левоповоротной); *вариант 2* – сооружение петлевого съезда от ул. Юбилейной с примыканием к ул. Дзержинского для организации движения со стороны моста на ул. Кульнева с правым поворотом на 270 градусов и двумя проездами через перекресток. Левый поворот со стороны моста закрывается. Радиус съезда – не менее 20...25 м, при этом его длина позволит разместить все левоповоротные транспортные средства: *вариант 3* (на перспективу) – использование имеющейся разницы в высотных отметках ул. Юбилейной и Кульнева для устройства развязки в разных уровнях неполного типа. Для движения с ул. Юбилейной на ул. Кульнева устраивается соединительный проезд. Перекресток ул. Юбилейной и соединительного проезда размещается примерно между существующими остановочными пунктами автобусов, на нем устраиваются дополнительные полосы для поворотных потоков (правоповоротного со стороны моста через Западную Двину, левоповоротного – со стороны ул. Бровки), размещаются пешеходные переходы, вводится светофорное регулирование. Вариант целесообразно реализовать при выполнении крупного ремонта на мосту через реку Западная Двина, требующего длительного закрытия движения.

Пересечение улиц Гагарина и Суворова требует полной реконструкции для улучшения условий видимости и увеличения расстояния между перекрестком и железнодорожным переездом.

При сохранении узла в одном уровне улучшить условия движения можно путем переноса переезда на восток примерно на 150...200 м и сооружении новых подходов к нему от ул. Гагарина и ул. Суворова

с увеличением ширины проезжей части на них до 15 м (4 полосы движения). В этом месте расстояние от железнодорожной линии до ул. Гагарина достигает 50...60 м, а также значительно улучшатся условия видимости транспортных средств, движущихся со встречного и боковых направлений. Существенных изменений в условиях движения можно добиться только сооружением узла в разных уровнях. При этом в разных уровнях могут быть разделены только автомобильное и железнодорожное движение либо дополнительно устроена развязка в разных уровнях для улиц Гагарина и Суворова. Однако вероятность реализации варианта в разных уровнях в пределах расчетного срока невелика.

На перекрестках улицы Октябрьской с ул. Гоголя и Пушкина целесообразно устроить приподнятые островки безопасности на пешеходных переходах через ул. Октябрьскую, которые позволят более четко канализировать пешеходное движение, разместить светофоры в зоне наилучшей видимости, создать эффект «сужения проезжей части» для психологического регулирования скорости на участке ул. Октябрьской, прилегающем к вокзалам.

Улучшение условий движения на регулируемых участках УДС. Значение показателя «насыщенности светофорными объектами» в Полоцке (НСФО = 1,81) находится в среднем диапазоне для городов Беларуси, что свидетельствует о некоторых резервах в улучшении условий движения, которые могут быть использованы путем применения светофорного регулирования или оптимизации его показателей.

Введение светофорного регулирования на новых участках УДС. Применение светофорного регулирования целесообразно на пересечении Минского шоссе с выездом из промзоны. При этом к указанному перекрестку следует устроить проезд от ул. Мариненко, перенести остановочные пункты автобусов и пешеходные переходы. Светофорное регулирование необходимо вводить на Т-образном перекрестке улиц Бровки и Мариненко (путем реконструкции существующего СФО ул. Бровки – СШ № 4 на пешеходном переходе, расположенном на восточном подходе к этому перекрестку). При реализации одного из вариантов нового планировочного решения на пересечении Юбилейная – проспект Маркса необходимо устройство светофорного регулирования.

Корректировка существующего светофорного регулирования. На регулируемом пешеходном переходе ул. Октябрьская – База следует организовать светофорное регулирование и на выезде со стояночной площадки, который в настоящее время функционирует в нерегулируемом режиме, что создает конфликтные ситуации на пешеходном переходе. На пересечениях Октябрьская – Гоголя и Октябрьская – Пушкина при устройстве островков безопасности разместить на них дорожные светофоры и знаки, скорректировать переходные интервалы светофорного регулирования. На пересечении Октябрьская – Пушкина организовать пешеходный переход через восточный подход ул. Октябрьской, на котором регулярно фиксируются нарушения ПДД пешеходами, а также установить еще один транспортный светофор на подходе ул. Пушкина. На пересечениях Юбилейная – Коммунистическая, Коммунистическая – Свердлова, Бровки – 23-х Гвардейцев следует заменить трехфазные схемы светофорного регулирования двухфазными, что позволит повысить пропускную способность узлов без ухудшения показателей безопасности.

На пешеходных переходах Октябрьская – ОАО «Технолит» и Гагарина – СШ № 13 перевести светофорные объекты в режим круглосуточного регулирования с вызовом разрешающего сигнала пешеходами. На всех регулируемых участках (кроме перекрестков Зыгина – Богдановича, Октябрьская – Е. Полоцкой, Бровки – 23-х Гвардейцев, Юбилейная – Кульнева) привести в соответствие с нормативными требованиями сигналы, обозначающие переходные интервалы для пешеходов.

Для реализации одного из вариантов нового планировочного решения на пересечении Юбилейная – Кульнева необходим перенос существующего светофорного объекта на новый перекресток.

Повышение уровня и характеристик АСУДД. Для повышения эффективности управления дорожным движением в Полоцке целесообразно на базе существующих СФО (АСУДД-100 по классификации БНТУ) сформировать систему уровня 5 (общегородского) либо включить их в состав региональной АСУДД-604 Витебской области (уровень 6). Центральный диспетчерский пункт (ЦДП) АСУДД-5 может размещаться на территории Новополоцкого участка Витебского СМЭУ.

Базовые периферийные устройства АСУДД (дорожные контроллеры «Думка»), уже установленные на 10 СФО Полоцка, могут использоваться в АСУДД-5 или АСУДД-6. Дорожные контроллеры УК-2 (СФО Октябрьская – ОАО «Технолит», Коммунистическая – Юбилейная, Бровки – СШ № 4) должны быть заменены в первоочередном порядке, так как не обеспечивают контроль исправности критических элементов оборудования (красные сигналы светофоров, включение зеленых сигналов в пересекающихся направлениях). Дорожные контроллеры ДКМ, управляющие СФО Октябрьская – Юбилейная, Гагарина – СШ № 13, по техническим характеристикам могут использоваться в АСУДД-5, однако они уже отработали установленный срок службы, поэтому также подлежат замене.

С учетом возможностей современных дорожных контроллеров наиболее перспективным направлением при организации АСУДД-5 или АСУДД-6 в больших городах (в т. ч. в Полоцке) является использование беспроводных каналов связи стандарта GSM. При таком варианте создание ЦДП в Новополоцке необязательно, а СФО могут быть подключены к ЦДП региональной АСУДД-604 в Витебске.

Для повышения пропускной способности и безопасности движения на основной магистрали правобережной части города (ул. Зыгина – ул. Октябрьская) на ней целесообразна организация координированного светофорного регулирования, включающего 7 СФО на участке от ул. Богдановича до ул. Юбилейной. До «расшивки» самого «узкого» места (пересечения улиц Октябрьской и Е. Полоцкой) координированное регулирование может быть организовано на двух самостоятельных участках: западнее и восточнее ул. Е. Полоцкой. Координированное регулирование следует также организовать на ул. Юбилейной (3 СФО) и Бровки (2 СФО). При внедрении координированного регулирования следует применять технические средства для информирования водителей о рекомендуемой скорости движения (с переменной информацией, изменяющейся в течение светофорного цикла).

Общей рекомендацией является регулярная корректировка режимов светофорного регулирования всех СФО города при любом уровне АСУДД, а также координированного управления (если оно будет внедрено) на ул. Октябрьской, Юбилейной, Бровки. Для сбора актуальных исходных данных необходимо регулярное проведение обследований транспортных и пешеходных потоков, условий движения на УДС города.

Совершенствование размещения и оборудования остановочных пунктов маршрутных транспортных средств (ОП МТС). Для устранения имеющихся недостатков в размещении и оборудовании ОП МТС в Полоцке целесообразно проведение следующих мероприятий. Устройство заездных карманов на ОП, не оборудованных ими, в первую очередь на ул. Октябрьской, Бровки и Богдановича.

Перенос 19 ОП, размещенных с «неправильным» смещением по отношению к ОП встречного направления, и размещение между ОП пешеходных переходов (ул. Космонавтов, Гагарина, Суворова, Бабушкина и др.), устройство посадочных площадок с нормативными параметрами. Перенос 2 ОП, расположенных на подходах к перекрестку Октябрьская – Е. Полоцкой, за перекресток. Перенос 7 ОП, размещенных на малом расстоянии перед перекрестками (Гагарина – пер. Гагарина, Юбилейная – Кульнева, Юбилейная – пр-т Маркса, Коммунистическая – Гоголя и др.). Установка павильонов для ожидания пассажиров в первую очередь на тех ОП, на которых посадка пассажиров существенно превышает высадку. При радиальной схеме маршрутов, сложившейся в Полоцке, такие ОП расположены для направления движения к автовокзалу. На всех остановочных пунктах размещение дорожных знаков и табличек с расписанием движения привести в соответствие с нормативными требованиями. На остановочных пунктах с интенсивным движением автобусов и маршрутных такси, кроме ДЗ 5.12.1, 5.12.2, установить ДЗ 5.14.1 для разделения остановочных площадок, используемых автобусами и маршрутными такси.

Для обслуживания остановочного пункта «Автовокзал» оборудовать регулируемый пешеходный переход через ул. Октябрьскую с восточной стороны перекрестка Октябрьская – Пушкина. Необходимо устроить улучшенное покрытие (где оно отсутствует, либо разрушено) на всех разворотных площадках конечных пунктов.

Заключение. Проведенные исследования позволили разработать предложения по улучшению планировочных характеристик улично-дорожной сети города, совершенствованию системы транспортно-обслуживания, развитию светофорного регулирования, размещения и оборудования остановочных пунктов автобусов, условий движения транспортных и пешеходных потоков. Полученные результаты могут быть использованы при разработке комплексной транспортной схемы Полоцка и схем организации дорожного движения.

Поступила 01.06.2012

ISSUES OF SCHEDULING DEVELOPMENT AND TRANSPORT PROBLEMS IN POLOTSK

V. IVANOV, D. MOZALEVSKII, N. ARTYUSHEVSKAYA'S

The article presents the results of the analysis of road accidents, traffic conditions in Polotsk, as well as recommendations for improving the quality of transport services, improving the characteristics of the street network planning, transport planning hubs, as well as road conditions.

УДК 656.13.05

ПРОГНОЗИРОВАНИЕ АВАРИЙНОСТИ ПО ПОТЕНЦИАЛЬНОЙ ОПАСНОСТИ: НАПРАВЛЕНИЯ СОВЕРШЕНСТВОВАНИЯ

канд. техн. наук, доц. Д.В. КАПСКИЙ

(Белорусский национальный технический университет, Минск)

Приводятся результаты исследований по разработке нового метода «Конфликтных зон» прогнозирования аварийности по потенциальной опасности и созданию комплекса методик прогнозирования аварийности по данному методу для различных видов конфликтов, имеющих место на регулируемых перекрестках и искусственных неровностях. Для каждого вида конфликта установлены закономерности формирования конфликтных зон, значения порога чувствительности по потенциальной опасности, значения коэффициентов динамического приведения аварий различной тяжести последствий, а также нелинейные зависимости аварий от потенциальной опасности, учитывающие физическую сущность рассматриваемых конфликтов.

По данным литературных источников, за шесть лет в Республике Беларусь произошло 554 521 аварии, в том числе с пострадавшими – 41 914 аварии, в которых ранены 44 621 и погибли 8 509 человек. Статистические данные указывают на то, что в авариях ежедневно гибнут около 4 человек и около 18 получают ранения [1 – 4]. Динамика аварийности в Республике Беларусь за 2006 – 2011 годы проиллюстрирована рисунком 1.

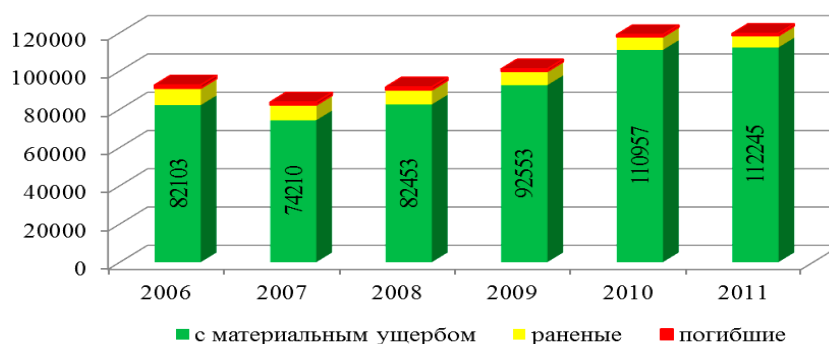


Рис. 1. Динамика аварийности в Республике Беларусь (2006 – 2011 гг.)

Зависимость аварийности от различных факторов в условиях Республики Беларусь, однако, не установлена, что вынуждает пользоваться западноевропейскими, американскими или японскими данными, которые не учитывают особенности нашей страны. В Российской Федерации ежегодно происходит около 200 тысяч аварий с пострадавшими, в которых гибнут более 26 тысяч человек и более 250 тысяч человек получают ранения. Российские ученые проводят исследования по созданию и совершенствованию методов оценки безопасности движения, которая определяется аварийностью. Оценка безопасности на существующих (длительное время) объектах проводится по результатам статистического анализа аварийности [5 – 8]. Анализ позволяет выделить следующие показатели:

- абсолютное число аварий (суммарно или для каждой тяжести последствий);
- относительное (на 1 млн·авт·км) число аварий;
- коэффициент тяжести (отношение числа погибших к числу пострадавших);
- материальный ущерб от аварий.

Оценка безопасности на введенных в эксплуатацию (вновь построенных) объектах проводится по результатам прогнозирования аварийности. В Российской Федерации и в других странах используются следующие методы (рекомендованы действующими техническими нормативными правовыми актами Российской Федерации):

- **статистический метод** [6 – 8], основанный на анализе статистических данных по влиянию на аварийность типовых мероприятий по изменению условий движения;

- **метод линейных графиков коэффициентов аварийности** (разработан российским исследователем В.Ф. Бабковым [9]), основанный на построении и анализе эпюры условной опасности на каждом типовом участке дороги. Эта опасность, выражаемая итоговым коэффициентом аварийности $K_{ит}$, определяется как произведение частных коэффициентов аварийности K_a , характеризующих условную опасность

отдельных факторов. В результате на эпюре итоговых коэффициентов для всей дороги четко видны участки с повышенной условной опасностью;

- **метод линейных графиков коэффициентов безопасности** (разработан В.Ф. Бабковым [9; 10]), основанный на построении эпюры скоростей движения на дороге и выявлении мест и величины перепадов скорости, по которым и осуществляется оценка безопасности: чем больше перепадов скоростей движения и чем они круче, тем опаснее;

- **метод конфликтных точек** [11] (автор – Г. Раппопорт, ФРГ), основанный на определении числа и типа конфликтных точек, которые по степени опасности (в порядке убывания) делятся на пересечения, слияния и отклонения. Оценка безопасности в основном осуществляется по сумме произведений числа конфликтных точек на степень их опасности;

- **метод конфликтных ситуаций** [12 – 15] (предложен К. Хайденом, Швеция), основанный на экспериментальном определении на реально существующем объекте числа видимых опасных (конфликтных) ситуаций, которые с определенной для данного вида конфликта закономерностью возникают в тысячи раз чаще, чем происходят аварии, с последующим пересчетом числа конфликтных ситуаций на число аварий посредством соответствующих коэффициентов приведения.

Однако эти методы не учитывают деталей особенностей конфликтных объектов, поэтому имеют неприемлемо низкую точность прогноза. К тому же методы линейных графиков относятся в основном к линейным участкам загородных дорог; попытки ученых применить их к городским конфликтным объектам не дали приемлемых результатов. Что касается метода конфликтных ситуаций, то он требует реального объекта и не может быть использован в процессе проектирования.

Для оценки работоспособности метода конфликтных участков проводился расчет потенциальной опасности по методике прогнозирования аварийности на регулируемых перекрестках с локальным регулированием, по выборке из 36 регулируемых перекрестков, 2411 конфликтных точек, 908 аварий (для моделирования использовалась статистика аварий за три года).

В исследуемом методе необходимо проводить определение потенциальной опасности трех различных режимов движения – внутрифазного, межфазного и нерегулируемого, при этом потенциальная опасность каждый раз суммируется в пределах всего перекрестка. Поэтому при исследовании адекватности метода необходимо рассмотреть три варианта построения зависимости аварийности от потенциальной опасности. Проверка значимости модели осуществлялась с помощью F -критерия. Построение регрессионной модели осуществлялось с помощью стандартных математических пакетов. Вид зависимости выбирался, исходя из физического смысла рассматриваемого параметра потенциальной опасности.

Обработка полученных расчетных значений при исследовании зависимости между аварийностью и потенциальной опасностью показала, что для межфазного (рис. 1, а) и нерегулируемого (рис. 1, б) режима движения существует статистически значимая функциональная связь. Зависимость аварийности от потенциальной опасности внутрифазного режима движения (рис. 1, в) статистически малозначима (критерий Фишера равен 2,1, что меньше табличного значения критерия Фишера для данных объемов выборки и уровня значимости $\gamma = 0,05$) и имеет коэффициент корреляции 0,27.

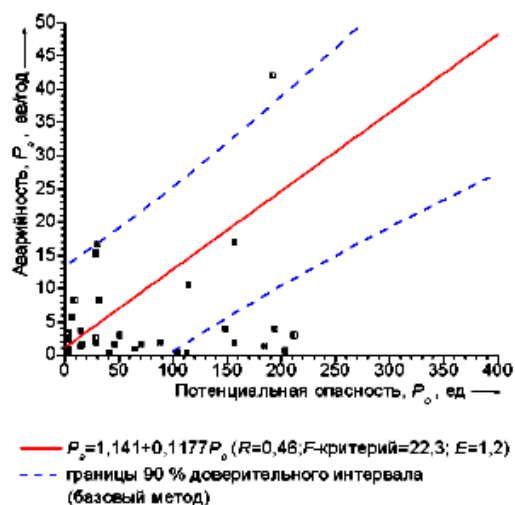
Поскольку зависимости имеют недостаточную сходимость (коэффициент линейной ошибки аппроксимации E не ниже 1,2), то исследуемый метод конфликтных участков нуждается в коренном совершенствовании.

В процессе исследований был разработан метод «Конфликтных зон», который адекватно реагирует на изменения транспортно-пешеходной нагрузки и условий движения, позволяет прогнозировать аварийность для практических целей не только на существующих, но и проектируемых объектах. Для данного метода разработан комплекс методик прогнозирования аварийности на регулируемых перекрестках и на искусственных неровностях в различных видах конфликтов «транспорт – транспорт» и «транспорт – пешеход» (рис. 2).

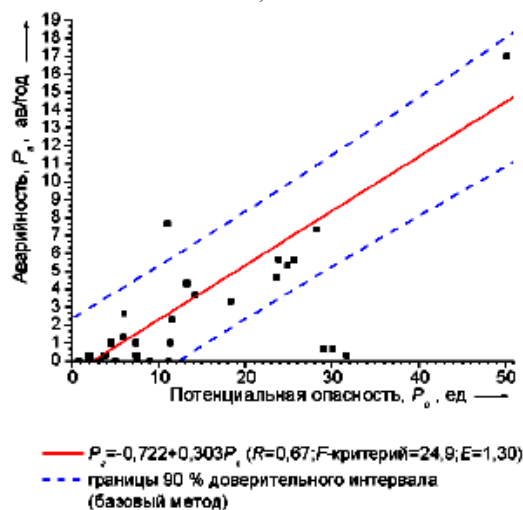
В расчетную модель определения потенциальной опасности, взятую из базового метода, последовательно вводились изменения, после чего находились наилучшие зависимости между аварийностью и потенциальной опасностью для измененной модели. Затем в модель поэтапно вводились очередные изменения, учитывающие новые факторы, влияющие на аварийность, и вновь подбирались наилучшие зависимости, причем перебор вариантов производился и для всех предыдущих изменений. На основе статистических (ретроспективных) данных по аварийности, соответствующих некоторой выборке конфликтных объектов, делается уточнение зависимости аварийности от потенциальной опасности. При этом каждый вновь вводимый фактор оценивается с точки зрения его значимости для модели.

Метод последовательного введения факторов достаточно хорошо известен. Например, аналогичный подход применяется в многошаговых задачах принятия решения в условиях неопределенности. В рассматриваемой модели этот подход представляется нам наиболее приемлемым, поскольку позволяет учитывать большее количество факторов, сделав при этом процесс введения факторов вычислительно эффективным и наглядным. Кроме того, при этом не только уточняется способ определения

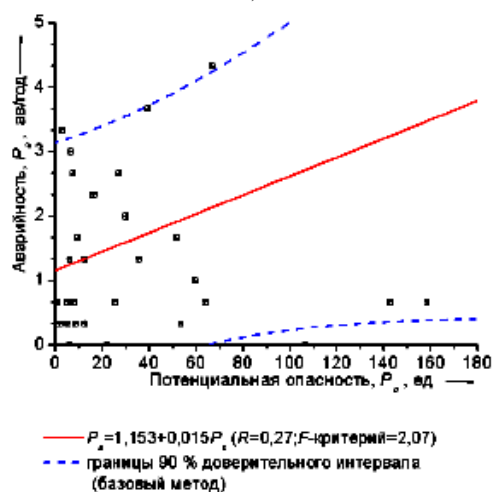
входного параметра (потенциальной опасности), но и проводится оптимизация параметров соответствующей



а)



б)



в)

Рис. 1. Зависимость аварийности на перекрестке от потенциальной опасности:

а – межфазного режима; б – нерегулируемого режима; в – внутрифазного режима

регрессионной зависимости аварийности от потенциальной опасности. Выборка конфликтных объектов, на которой проводится уточнение модели, носит характер обучающей для указанной уточненной регрессии. Для того чтобы сделать процесс введения новых факторов более упорядоченным, предлагается (на основе статистических данных) ввести на множестве факторов иерархическую структуру, т.е. произвести их априорное ранжирование. И так до тех пор, пока в расчетную модель не были введены все запланированные изменения. Полученные зависимости обеспечили точность прогноза, приемлемую для выполнения практических задач при оптимизации решений по повышению безопасности движения и, таким образом, цель исследований была достигнута.

Предложена модифицированная структурная формула расчета потенциальной опасности:

$$P_o = P_{on}^a \cdot K_x^a \cdot K_b^a \cdot K_c^a \cdot K_n^a \cdot K_y^a \cdot K_t, \text{ ед.}, \quad (1)$$

где $a_1 - a_6$ – показатели степени, для их получения организован машинный эксперимент.

Проведены расчетные исследования по определению численных значений показателей степени $a_1 - a_6$, позволяющих более адекватно описать зависимость аварийности от потенциальной опасности различных режимов. В результате исследований получены различные показатели степени $a_1 - a_6$ для различных видов конфликтов, режимов движения для каждого объекта исследований (таблица).

Принципиально новый метод отличается суммированием потенциальной опасности в пределах конфликтной зоны. Предложена следующая расчетная зависимость:

$$P_{oz} \left[\sum_{i=1}^N P_{oi}^m \right]^n, \quad (2)$$

где P_{oz} – потенциальная опасность конфликтной зоны, ед.; P_{oi} – потенциальная опасность конфликтных точек, входящих в конфликтную зону, ед.; N – количество конфликтных точек в конфликтной зоне; m и n – показатели степени.

В результате компьютерного поиска наилучших зависимостей между аварийностью и потенциальной опасностью получены значения показателей степени m и n , приведенные в таблице для каждого вида конфликтов, режимов движения по каждому объекту.

Известно, что многие конфликтные объекты работают безаварийно в течение довольно длительного времени. Детальный очаговый анализ аварийности на исследуемых объектах показал, что в значительной части конфликтных точек аварии также отсутствуют. Это позволило выдвинуть гипотезу, что потенциальная опасность, не превышающая некоторого критического (порогового) значения, не вызывает очаговой аварийности. Физический смысл этого явления, по-видимому, заключается в том, что система ВАДС (водитель – автомобиль – дорога – среда движения) способна самостоятельно (автоматически) разрешать кон-

фликты

малой опасности. При этом постоянное совершенствование конструкции автомобилей в области активной и пассивной безопасности, рост профессионального уровня водителей, общение людей с автомобильной техникой с раннего возраста и другие факторы привели к тому, что минимальный уровень опасности, который разрешается автоматически в системе ВАДС, или так называемый «*порог чувствительности*» потенциальной опасности, постоянно повышается. Поэтому потенциальная опасность конфликтных точек, которая меньше порога чувствительности, не должна суммироваться при определении потенциальной опасности конфликтных зон. Это позволит получить более значимые зависимости и повысить точность прогноза. Машинным экспериментом по определению порога чувствительности установлены значения $P_{o\ min}$ для всех трех режимов движения для всех видов конфликтов, имеющих на исследуемых объектах.

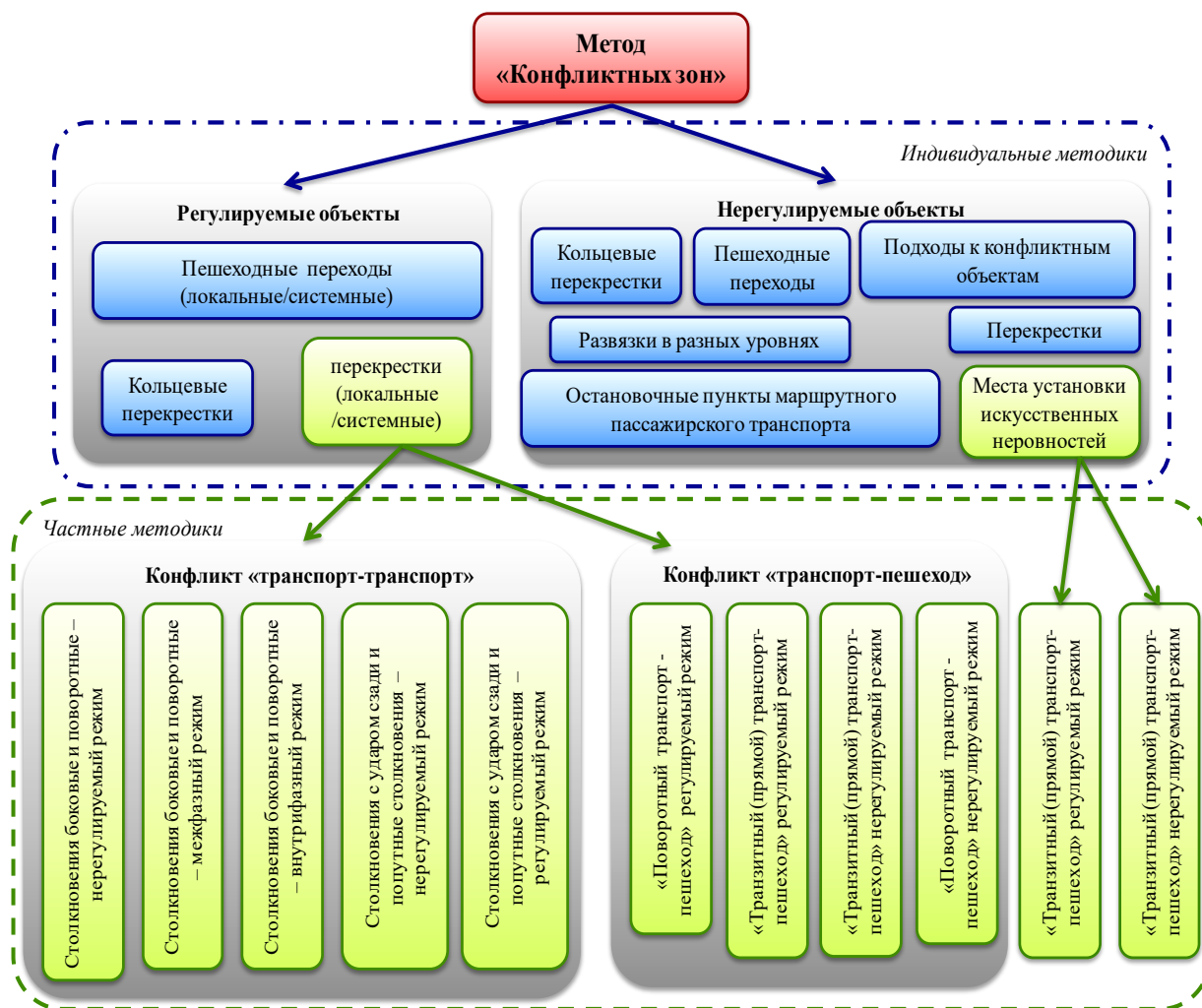


Рис. 2. Структура метода «Конфликтных зон»

В таблице приведены значения полученных показателей, входящих в расчетные формулы определения потенциальной опасности конфликтных зон.

Как следует из таблицы, например, в конфликте «транспорт-пешеход» при наличии искусственной неровности пороговое значение потенциальной опасности значительно выше, чем для этого конфликта на перекрестках. Это объясняется тем, что при наличии искусственной неровности пешеходы переоценивают свою защищенность и принимают несколько больший риск.

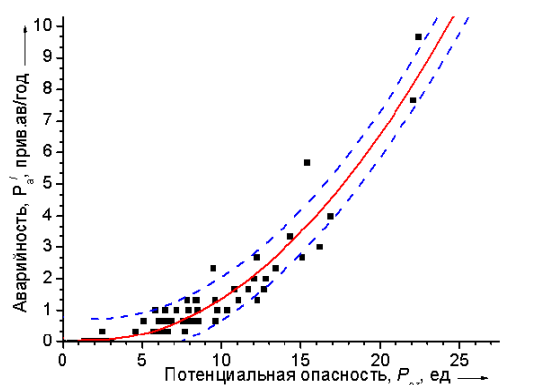
Необходимо отметить, что полученные расчетные значения критерия Фишера больше табличных для пороговых объемов выборки и уровня значимости $\gamma = 0,05$ (выборка для регулируемых перекрестков составила 2445 аварий за три года, совершенных на 142 перекрестках и 137 пешеходных переходах, находящихся в зоне влияния перекрестков. В исследуемых конфликтах, совершаемых на искусственных

неровностях, выборка за три года составила 449 аварий, произошедших в зоне 80 нерегулируемых пешеходных переходов). Следовательно, полученные математические модели для определения аварийности по потенциальной опасности адекватно отражают функционирование системы ВАДС и происходящих в ней процессов на исследуемых конфликтных объектах.

Значения показателей для расчета потенциальной опасности различных видов конфликтов

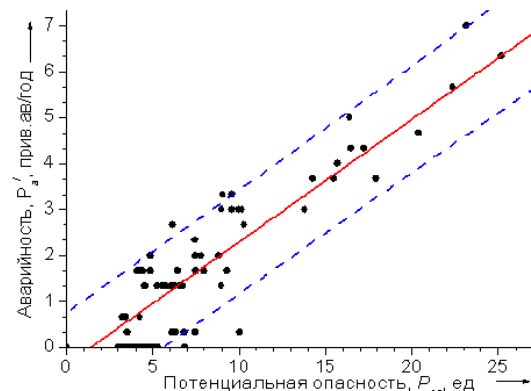
Объект	Вид конфликта, режим движения	Показатель								
		a_1	a_2	a_3	a_4	a_5	a_6	m	n	$P_{o\min}$, ед.
Регулируемые перекрестки	Столкновения боковые и поворотные, нерегулируемый режим	0,9	0,98	1,12	0,92	1,02	1,2	1,5	0,65	0,77
	Столкновения боковые и поворотные, внутрифазный режим	1,2	0,94	1,08	1,1	0,96	1,02	0,5	0,85	1,5
	Столкновения боковые и поворотные, межфазный режим	0,92	1,18	1,04	1,0	1,08	0,94	0,75	0,5	0,1
	Столкновения попутные и с ударом сзади, регулируемый режим	1,02	0,98	1,12	1,1	1,06	1,04	1,25	0,7	3,79
	Столкновения попутные и с ударом сзади, нерегулируемый режим	0,96	0,94	0,88	1,11	1,1	1,12	0,75	0,8	1,85
	Конфликт «поворотный транспорт – пешеход», регулируемый режим	0,92	0,84	0,86	1,06	1,02	1,02	0,6	0,8	0,01
	Конфликт «поворотный транспорт – пешеход», нерегулируемый режим	1,14	1,08	0,86	0,98	1,02	1,12	0,6	0,75	0,016
	Конфликт «транзитный транспорт – пешеход», регулируемый режим	1,12	1,1	1,1	0,94	1,14	1,08	0,75	0,9	0,82
	Конфликт «транзитный транспорт – пешеход», нерегулируемый режим	0,98	1,16	1,04	0,96	1,2	1,1	0,7	0,8	0,63
Искусственные неровности	Конфликт «транспорт – транспорт»	0,9	0,98	1,12	0,92	1,02	1,20	0,5	0,7	0,27
	Конфликт «транспорт – пешеход»	0,94	0,98	1,04	0,90	1,02	1,20	0,7	0,8	0,91

На рисунках 3 и 4 показаны некоторые зависимости для приведенной аварийности от потенциальной опасности.



— $P'_a = 0,103 - 0,072P_{oz} + 0,02P_{oz}^2$ ($R=0,81$; F -критерий=290,1; $E=0,56$)
 - - - границы 90 % доверительного интервала

Рис. 3. Зависимость приведенной аварийности – столкновения с ударом сзади – от потенциальной опасности нерегулируемого режима



— $P'_a = -0,364 + 0,267P_{oz}$ ($R=0,83$; F -критерий=466,7; $E=0,53$)
 - - - границы 90 % доверительного интервала

Рис. 4. Зависимость приведенной аварийности в конфликте «транзитный транспорт – пешеход» от потенциальной опасности нерегулируемого режима

Заключение. Разработана совокупность методик, позволяющая реализовать комплекс работ по оценке аварийной эффективности принимаемых решений на регулируемых перекрестках и искусствен-

ных неровностях. Эта совокупность включает одиннадцать частных методик прогнозирования аварийности по методу «Конфликтных зон» в зависимости от **типа и вида конфликта**, объединенные в две индивидуальные методики – каждая для исследуемого **типового объекта**.

Каждая индивидуальная методика учитывает **особенности данного конфликтного объекта** и включает несколько частных методик, учитывающих **специфику конкретного вида конфликта** на данном объекте.

Индивидуальная методика прогнозирования аварийности на регулируемых перекрестках включает девять частных методик с учетом нерегулируемого, внутрифазного и межфазного режимов конфликтного движения, а также конфликтов «транспорт – транспорт» и «транспорт – пешеход»:

- в конфликте «транспорт – транспорт», столкновения боковые и поворотные – три частные методики, по одной для нерегулируемого, внутрифазного и межфазного режимов движения;

- в конфликте «транспорт – транспорт», столкновения с ударом сзади и попутные столкновения – две частные методики для нерегулируемого и регулируемого режимов движения;

- в конфликте «поворотный транспорт – пешеход» – две частные методики для нерегулируемого и регулируемого режимов движения;

- в конфликте «транзитный транспорт – пешеход» – две частные методики для нерегулируемого и регулируемого режимов движения.

Индивидуальная методика прогнозирования аварийности на искусственных неровностях включает две частные методики:

- 1) в конфликте «транспорт – транспорт», столкновения с ударом сзади и попутные на самой неровности;

- 2) в конфликте «транзитный транспорт – пешеход».

В результате проведенных исследований для регулируемых перекрестков и искусственных неровностей для каждого вида конфликта установлены:

- закономерности формирования конфликтных зон;

- значения порога чувствительности по потенциальной опасности;

- значения коэффициентов динамического приведения аварий различной тяжести последствий;

- нелинейные зависимости аварий от потенциальной опасности, учитывающие физическую сущность рассматриваемых конфликтов.

Полученные зависимости аварийности от потенциальной опасности являются статистически значимыми и имеют точность, достаточную для практических работ по повышению безопасности дорожного движения.

Таким образом, метод «Конфликтных зон» более детально учитывает специфические особенности исследуемого объекта – около 110 параметров, дает относительно высокую (более чем в пять раз по сравнению с существующими методами) точность прогноза (F – критерий ≥ 200 ; $R \geq 0,74$; $E \leq 0,68$), пригодную для практического использования в области повышения безопасности дорожного движения, что впервые позволяет прогнозировать аварийность не только на существующих объектах, но и на проектируемых или реконструируемых еще на стадии принятия решений.

Предложенный метод на сегодняшний день является прогрессивным, позволяет дать точную оценку аварийности, используется многими научно-исследовательскими и проектными учреждениями в Республике Беларусь, а также в Российской Федерации, Украине и Латвии.

ЛИТЕРАТУРА

1. Справочно-информационные материалы «Состояние безопасности дорожного движения в Республике Беларусь в 1999 – 2006 годах и наметившиеся тенденции»: аналит. сб. / под общ. ред. В.Л. Филистовича. – Минск: Полиграф. центр МВД Респ. Беларусь, 2007. – 124 с.
2. Аналитический сборник по аварийности. – Минск: Полиграф. центр МВД Респ. Беларусь, 2008. – 81 с.
3. Состояние безопасности дорожного движения в Республике Беларусь в 1999 – 2008 годах и наметившиеся тенденции: аналит. сб. / сост.: В.В. Бульбенков, А.А. Сушко, О.Г. Ливанский; под общ. ред. А.Н. Кулешова. – Минск: Полиграф. центр МВД Респ. Беларусь, 2009. – 144 с.
4. Сведения о состоянии дорожно-транспортной аварийности в Республике Беларусь в 2010 году: аналит. сб. / сост.: В.В. Бульбенков, О.Г. Ливанский; под общ. ред. Е.Е. Полудня. – Минск: МВД Респ. Беларусь, 2011. – 89 с.
5. Новиков, А.В. Оценка мероприятий по управлению и безопасности движения на многополосных дорогах: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.22.10 / А.В. Новиков; МАДИ (ГТУ). – М., 2005. – 23 с.

6. Клишковштейн, Г.И. Организация дорожного движения: учебник для вузов / Г.И. Клишковштейн, М.Б. Афанасьев. – 5-е изд., перераб. и доп. – М.: Транспорт, 2001. – 247 с.
7. Бондар, Т.В. Ступені небезпечності дорожніх умов на ділянках концентрації ДТП, визначених з урахуванням аварійності з пострадалими та матеріальним збитком / Т.В. Бондар // Дороги і мости: збірник наукових праць / ДерждорНДІ. – Київ, 2008. – Вип. 10. – С. 43 – 50.
8. Руководство по устранению и профилактике возникновения участков концентрации ДТП при эксплуатации автомобильных дорог: ОДМ 218.4.004-2009. – Введ. 01.08.09. – М.: Федеральное дорожное агентство (Росавтодор), 2009. – 118 с.
9. Бабков, В.Ф. Дорожные условия и безопасность движения: учебник для вузов / В.Ф. Бабков. – М.: Транспорт, 1993. – 271 с.
10. Білятинський, О.А. Діапазон підсумкових коефіцієнтів аварійності, при яких доцільно виводити транзитні автомобілі з в'їзних на об'їзні дороги / О.А. Білятинський, В.П. Старовойда // Безпека дорожнього руху України. – 1999. – № 4(5). – С. 30 – 35.
11. Rappoport, H.A. Die Ausbildung plangeicher Knotenpunkte im Landstrassennetz / H.A. Rappoport // Strassen und Tiefbau. – 1955. – № 8. – S. 499 – 510.
12. Laureshyn, A. Application of automated video analysis to road user behaviour: doctoral thesis / A. Laureshyn. – Lund, 2010. – 202 p.
13. The Swedish Traffic Conflict Technique // Department of Technology and Society Lund University in Sweden [Electronic resource]. – Mode of access: http://www.tft.lth.se/fileadmin/tft/dok/Brochure_ConflictTechnique.pdf. – Date of access: 09.03.2005.
14. Archer, J. Traffic Conflict Technique: Historical to current State-of-the-Art / J. Archer // Institutionen för Infrastruktur KTH [Electronic resource]. – Stockholm, 2001. – Mode of access: http://www.ctr.kth.se/publications/ctr2001_05.pdf. – Date of access: 12.07.2005.
15. Hydén, C. Evaluation of traffic safety, based on micro-level behavioural data: Theoretical framework and first implementation / C. Hydén, A. Laureshyn, Å. Svensson // Elsevier, Accident Analysis and Prevention [Electronic resource]. – 2010. – Mode of access: http://www.tft.lth.se/fileadmin/tft/video_in_traffic/Publications/Laureshyn_Svensson_Hyden_2010.pdf. – Date of access: 30.03.2010.

Поступила 01.06.2012

**PREDICTING FAILURE RATE OF THE POTENTIAL DANGER:
AREAS FOR IMPROVEMENT**

D. KAPSKY

The paper presents the results of research to develop a new method of “conflict zones” on the prediction of the potential danger of road accidents and the creation of complex road accident prediction methods on this method for different types of conflicts taking place in the controlled junctions and road humps.

МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ

УДК 621.983.044

ВЛИЯНИЕ РЕЖИМОВ УПРОЧНЯЮЩЕЙ МАГНИТНО-ИМПУЛЬСНОЙ ОБРАБОТКИ НА ПРОЧНОСТНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ДЕРЕВОРЕЖУЩИХ НОЖЕЙ

д-р техн. наук, проф. А.В. АЛИФАНОВ
(Физико-технический институт НАН Беларуси, Минск);
Ж.А. ПОПОВА, А.С. ДЕМЯНЧИК
(Барановичский государственный университет)

Представлен новый метод упрочнения закаленных стальных изделий магнитно-импульсным воздействием, разработанный учеными Физико-технического института Национальной академии наук и Барановичского государственного университета. Даны описания специально разработанной магнитно-импульсной установки и индуктора для упрочняющей обработки изделий плоской формы. Рассмотрена структура упрочненных поверхностных слоев, которые несут деформационно-упрочненный характер; толщина и микротвердость слоя зависят от энергии и числа импульсов. Приводятся результаты опытно-промышленных испытаний плоских дереворежущих ножей из сталей 8Х6НФТ и 8ХФ, упрочненных магнитно-импульсным воздействием, на деревообрабатывающих предприятиях: упрочненные ножи показали повышение стойкости в 3 раза на операции обработки изделий из сосны и более чем в 1,5 раза на операции обработки изделий из твердых пород древесины (дуб, ясень), что говорит о высокой эффективности и перспективности применения разработанного метода в производстве.

Задача повышения эксплуатационной надежности инструмента приобретает все большее значение в связи с увеличением механических, тепловых и других видов воздействий на него, а также с резким их удорожанием. Для инструментов, разрушение которых начинается с поверхности, разработано большое количество методов поверхностного упрочнения, основанных на нанесении покрытий или на изменении состояния поверхностного слоя.

Используемые в настоящее время различные способы повышения ресурса инструментов (специальная термообработка, напыление, искровое легирование, лазерная обработка, ионное азотирование и т.д.) требуют применения дорогостоящего оборудования, иногда экологически небезопасного, специальной обработки упрочняемых поверхностей, дорогих высокопрочных порошков; после их применения зачастую необходимо дополнительно подвергать упрочненные поверхности шлифованию. В этой связи определенный интерес представляет метод упрочнения стальных изделий магнитно-импульсным воздействием.

Учеными Физико-технического института Национальной академии наук Беларуси и Барановичского государственного университета разработана новая технология повышения прочностных свойств стальных изделий путем воздействия сильным импульсным электромагнитным полем. При таком воздействии устраняются дефекты в кристаллической решетке, выравниваются внутренние напряжения, измельчается и становится более однородной структура металла [1]. Целью проводимой работы являлась проверка эффективности способа упрочнения импульсным магнитным полем стальных изделий, изготовленных из инструментальных легированных сталей, и изучение его влияния на структуру и механические свойства образцов. Для упрочняющей обработки применялась магнитно-импульсная установка (рис. 1) и специальный плоский индуктор (рис. 2), разработанные и изготовленные в ФТИ НАН Беларуси.

Магнитно-импульсная установка представляет собой генератор импульсного тока, состоящий из емкостного накопителя электрической энергии (высоковольтной конденсаторной батареи), рабочего органа (индуктора) и коммутирующего устройства (высоковольтного управляемого разрядника).

Для экспериментальных исследований в качестве упрочняемых изделий были выбраны плоские дереворежущие ножи из инструментальной легированной стали марки 8ХФ, широко применяемые при фрезеровании различных древесных материалов, в частности на УП «Мебельная фабрика «Лагуна» для обработки изделий из твердых пород древесины (дуба, ясеня), и ножи из стали марки 8Х6НФТ, применяемые на ОАО «Барановичдрев» для обработки изделий из сосны.

На верхнюю плоскую часть индуктора помещали партию упрочняемых ножей (рис. 3), которые через изолирующую прокладку с помощью специального приспособления прижимались к индуктору, а сам индуктор прижимался к столу магнитно-импульсной установки (рис. 4). Задавали определенные режимы обработки (образцы подвергались обработке энергией различной мощности от 2,5 до 6,0 кДж и количеством импульсов от 1 до 4). С помощью разрядника производился разряд конденсаторной батареи на индуктор. В рабочей зоне индуктора импульсное магнитное поле наводит в находящейся в нем металлической

заготовке вихревые токи. В результате взаимодействия токов индуктора и заготовки возникают мощные механические усилия, оказывающие давление как на заготовку, так и на индуктор. Под действием давления происходит упругопластическое обжатие образцов, изменяющее их структуру и прочностные свойства.

Сильное импульсное магнитное поле инициирует процессы аустенитно-мартенситного превращения, образование и дробление карбидов, измельчение зерен, что положительно сказывается на прочностных качествах стальных изделий [1].



Рис. 1. Магнитно-импульсная установка для упрочнения стальных изделий



Рис. 2. Специальный индуктор для упрочнения плоских стальных изделий



Рис. 3. Установка ножей на плоский индуктор



Рис. 4. Общий вид плоского индуктора с крепежным устройством

Для изучения структуры упрочненного слоя и измерения его микротвердости и толщины на боковых поверхностях дереворежущих ножей были изготовлены шлифы. Определенный участок в шлифе для проведения прицельной металлографии помечался тремя отпечатками микротвердости, по которым можно идентифицировать это место в шлифе при определении микротвердости и микроструктуры до и после магнитно-импульсной обработки.

В ходе проведения эксперимента проводились измерения микротвердости на упрочняемой поверхности ножей, обработанных при различных величине энергии и количестве импульсов. Измерения проводились твердомером ПМТ-3 по общепринятой методике в соответствии с ГОСТ 9450-60. Среднее значение микротвердости образцов из стали 8Х6НФТ до обработки составляло 542 кгс/мм^2 , после магнитно-импульсной обработки – 630 кгс/мм^2 ; для стали 8ХФ: до обработки – 485 кгс/мм^2 , после обработки – 580 кгс/мм^2 . Анализ приведенных зависимостей показывает, что микротвердость обработанных образцов увеличилась на 16...20 %.

На рисунке 5 представлены графики зависимости микротвердости упрочненных ножей из стали 8ХФ (1) и 8Х6НФТ (2) в зависимости от числа импульсов и при значении энергии импульса 2,5 кДж (рис. 5, а), 4 кДж (рис. 5, б) и 6 кДж (рис. 5, в). Числу импульсов «0» соответствует микротвердость ножей до магнитно-импульсной обработки.

Из представленных на рисунке графиков зависимостей видно, что микротвердость образцов возрастает как при увеличении энергии в импульсе, так и от числа импульсов.

Показатели микротвердости для образцов из стали 8ХФ во всех случаях ниже, чем из стали 8Х6НФТ, что можно объяснить влиянием соответствующих легирующих элементов в металле. Можно также отметить, что для данных сталей влияние на микротвердость образцов величины энергии в импульсе более эффективно, чем влияние числа импульсов. Более того, с увеличением энергии в импульсе эффективность упрочнения от изменения числа импульсов падает. Из этого можно сделать вывод, что с точки зрения экономии затрат энергии на процесс магнитно-импульсного упрочнения эффективнее оперировать увеличением энергии в импульсе, чем количеством импульсов. Это подтверждается данными, представленными на рисунках 5, б и 5, в: при энергии 6 кДж и одном импульсе твердость упрочненной поверхности ножа из стали 8Х6НФТ несколько превышает 600 кгс/мм² (затраты энергии – 6 кДж), а при энергии 4 кДж для того, чтобы получить такую же микротвердость, необходимо применить 4 импульса (4 кДж · 4 импульса = 16 кДж), т.е. в сумме затраты энергии во втором случае превышают затраты энергии в первом случае в 2,5 раза.

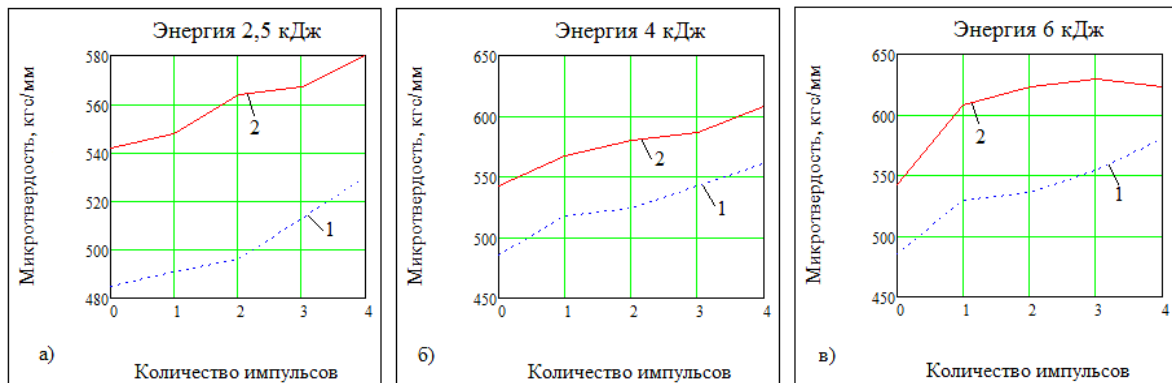


Рис. 5. Зависимость микротвердости упрочняемых поверхностей дереворежущих ножей от энергии в импульсе 2,5 кДж (а), 4 кДж (б), 6 кДж (в) и числа импульсов: 1 – нож из стали 8ХФ; 2 – нож из стали 8Х6НФТ;

Изучение и фотографирование структур были выполнены на металлографическом микроскопе Neophot 21 при увеличении 250.

На фотоснимках (рис. 6 и 7) показаны микроструктуры в области упрочненного слоя сталей 8Х6НФТ и 8ХФ соответственно. На рисунке 6, а и 7, а показаны структуры в исходном состоянии, а на рисунках 6, б и 7, б – после магнитно-импульсной обработки.

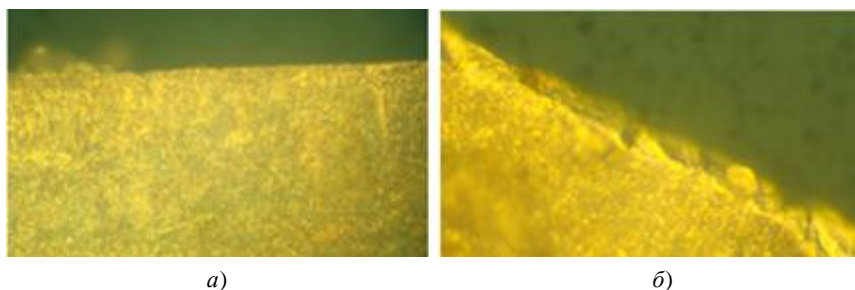


Рис. 6. Микроструктура образцов из стали 8Х6НФТ: в исходном состоянии (а); после обработки магнитным полем (б) (×250)

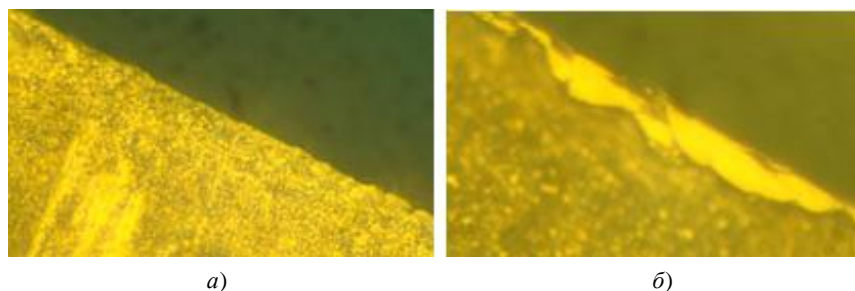


Рис. 7. Микроструктура образцов из стали 8ХФ: в исходном состоянии (а); после обработки магнитным полем (б) (×250)

На снимках (рис. 6, б и 7, б) четко виден упрочненный слой как у образцов из стали 8Х6НФТ, так и из стали 8ХФ. Он выделяется мелкозернистостью и сильно выраженной текстурой, что характерно для деформированных слоев металла. Толщина упрочненного слоя зависит от энергии и количества импульсов (от 30 до 75 мкм). С уменьшением энергии в импульсе толщина слоя уменьшается, и он имеет более ровный, однородный вид. С увеличением энергии толщина слоя увеличивается, но он приобретает неоднородный по глубине характер.

Измерения микротвердости по глубине образца показали, что в упрочненном слое микротвердость имеет максимальную величину, а при переходе через явно выраженную границу упрочненного слоя микротвердость заметно уменьшается, но при этом превышает микротвердость основы.

Для изучения влияния магнитно-импульсной обработки на прочностные показатели упрочненных ножей были проведены их испытания в производственных условиях. Для испытаний были выбраны ножи с максимальной микротвердостью упрочненной поверхности: для ножей из стали 8Х6НФТ она достигалась при энергии 6 кДж и 3 импульсах, а для стали 8ХФ – при энергии 6 кДж и 4 импульсах.

На ОАО «Барановичдрев» ножи, изготовленные из стали 8Х6НФТ и упрочненные магнитно-импульсным воздействием, прошли опытно-промышленные испытания на четырехстороннем фрезерном станке Yumat на операции фрезерования брусков для оконных створок из древесного материала «сосна клееная» в течение 2 месяцев и показали стойкость, в 3 раза превышающую стойкость таких же ножей, использованных на этой же операции, но не упрочненных магнитно-импульсным методом (на фрезу устанавливался комплект из 6 ножей).

Ножи, изготовленные из стали 8ХФ и упрочненные магнитно-импульсным воздействием, прошли опытно-промышленные испытания на УП «Мебельная фабрика «Лагуна» на фрезерном деревообрабатывающем станке ФШС1А на операции фрезерования плоскостей ножек стульев из твердых древесных пород «ясень» и «дуб» (на фрезу устанавливался комплект из 4 ножей). За период работы в течение 2 недель опытные ножи показали стойкость, более чем в 1,5 раза превышающую стойкость таких же ножей, не упрочненных магнитно-импульсной обработкой (определялась стойкость ножей до их переточки). Кроме того, установлено, что качество обрабатываемых поверхностей деталей улучшилось: снизилась шероховатость, отсутствуют сколы и подрывы древесины, также отмечена плавность хода ножей, и образование при обработке более мелкой (дробной) стружки, что в совокупности благоприятно сказывается на качестве изделия и снижает энергоемкость процесса резания.

После проведения производственных испытаний были исследованы геометрические параметры режущих кромок ножей как не упрочненных, так и упрочненных магнитно-импульсным воздействием. В частности, измерялись радиусы режущих кромок ножей до проведения испытаний (сразу после их заточки) и после опытно-промышленных испытаний до перезаточки. Измерения радиуса изношенных кромок ножей производились на инструментальном микроскопе ММИ-2 с радиусной головкой ОГР-23. Радиусы всех ножей (упрочненных и неупрочненных) перед началом испытаний находились в пределах 10...11 мкм. Средний радиус кромок неупрочненных ножей после окончания испытаний составил 30 мкм (увеличение радиуса затупления по сравнению с начальным – 3 раза).

На рисунке 8 представлены графики изменения износа режущей кромки ножей (среднее значение радиуса ее затупления), обработанных магнитно-импульсным воздействием – из стали 8ХФ (рис. 8, а) и 8Х6НФТ (рис. 8, б) в зависимости от числа импульсов при значениях энергии импульса 2,5 кДж (график 1), 4 кДж (график 2) и 6 кДж (график 3).

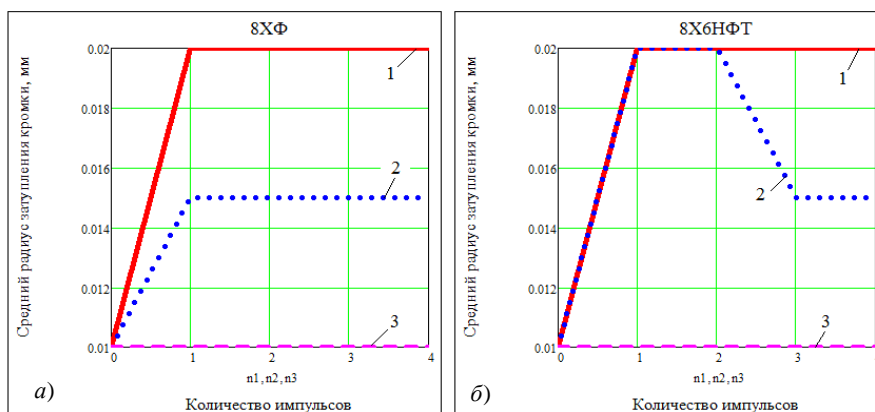


Рис. 8. Зависимость износа режущей кромки от количества импульсов для сталей марок 8ХФ (а) и 8Х6НФТ (б):

1 – энергия 2,5 кДж; 2 – энергия 4 кДж; 3 – энергия 6 кДж

Из рисунка 8 видно, что средний радиус кромки ножа, обработанного магнитно-импульсным полем с энергией импульса 2,5 кДж, составляет 20 мкм для сталей 8ХФ (рис. 8, а) и 8Х6НФТ (рис. 8, б) при количестве импульсов от 1 до 4. При увеличении энергии импульса до 4 кДж износ кромки ножа из стали 8ХФ увеличился до 15 мкм при количестве импульсов от 1 до 4 (рис. 8, а), а для стали 8Х6НФТ – при количестве импульсов 1 и 2 средний радиус затупления режущей кромки увеличился до 20 мкм, а при количестве импульсов 3 и 4 – до 15 мкм (рис. 8, б). С увеличением энергии импульса до 6 кДж износа режущей кромки за период испытаний практически не наблюдалось – средний радиус затупления кромки оставался в пределах 10...11 мкм как для стали 8ХФ, так и для стали 8Х6НФТ.

Полученные данные свидетельствуют о том, что для ножей из сталей 8ХФ и 8Х6НФТ с точки зрения уменьшения износа режущей кромки наиболее оптимальной является магнитно-импульсная обработка с энергией импульса 6 кДж.

Кроме радиуса режущих кромок были проведены измерения износа передней грани ножей в виде выемки определенной глубины, которая образуется за счет интенсивного воздействия движущейся по ней стружки. На рисунке 9 схематически показан нож с образовавшейся на нем выемкой. На профилемере МЕ-10 измеряли глубину h выемки, образовавшейся после проведения испытаний как упрочненных, так и неупрочненных ножей. Средняя глубина выемки на неупрочненных ножах составила 95 мкм, а упрочненных магнитно-импульсным воздействием – от 16 до 37 мкм в зависимости от величины энергии и количества импульсов (с увеличением этих показателей возрастает твердость поверхностного слоя и, соответственно, уменьшается размер выемки).

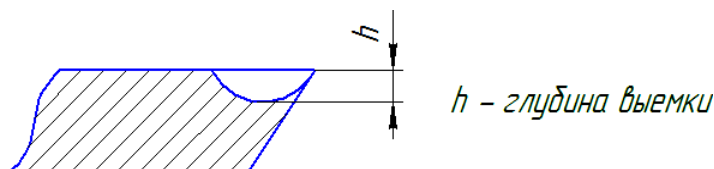


Рис. 9. Образование выемки на поверхности ножа в процессе резания древесины

Заключение. Результаты проведенных исследований показывают высокую эффективность и перспективность разработанного метода упрочнения плоских дереворежущих ножей, изготовленных из инструментальных легированных сталей. Установлено, что под воздействием магнитно-импульсного поля (от 2,5 до 6,0 кДж) образуется деформационно-упрочненный слой, толщина которого зависит от энергии и числа импульсов. В результате этого значительно повышаются прочностные и стойкостные характеристики упрочненных дереворежущих ножей.

Преимуществом магнитно-импульсной обработки по сравнению с другими известными методами упрочнения является то, что геометрические параметры и качество поверхности обработанных изделий не меняются, не требуются дополнительные операции термообработки, шлифования, а сам процесс отличается низким энергопотреблением, высокой производительностью, экологической чистотой.

ЛИТЕРАТУРА

1. Магнитно-импульсная упрочняющая обработка металлических изделий / А.В. Алифанов [и др.] // Технология ремонта, восстановления и упрочнения деталей машин, механизмов, оборудования, инструмента и технологической оснастки: материалы 9-й междунар. практ. конф., Санкт-Петербург, 10 – 13 апр. 2007 г.: в 2-х ч. – СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2007. – Ч. 1. – 509 с.

Поступила 03.08.2012

EFFECT OF A REINFORCING MAGNETIC-PULSE TREATMENT ON STRENGTH PROPERTIES OF WOOD-CUTTING KNIVES

A. ALIFANOV, ZH. POPOVA, A. DEMYANCHIK

Wood-cutting knives made of 8Х6НФТ and 8ХФ tool steels and hardened by their exposure to a pulsed magnetic field have undergone successful long-term production tests at different woodworking enterprises of the Republic of Belarus. As compared to analogous knives that had not been subjected to pulse magnetic processing they demonstrated increase in tool life by 1,5 times and up to 3 times when working oak and ash hard woods and pine, respectively. Thus, their implementation can be recommended for carrying out respective operations at woodworking enterprises of the Republic of Belarus.

УДК 621.762.242

**КОМПОЗИЦИОННЫЙ ПОРОШКОВЫЙ МАТЕРИАЛ ДЛЯ ВОССТАНОВЛЕНИЯ
ИЛИ УПРОЧНЕНИЯ ДЕТАЛЕЙ ДВИГАТЕЛЕЙ ВНУТРЕННЕГО СГОРАНИЯ**

*канд. техн. техн. наук, доц. А.П. КАСТРЮК, Т.В. ВИГЕРИНА,
канд. техн. техн. наук, доц. О.П. ШТЕМПЕЛЬ, канд. техн. техн. наук, доц. В.А. ФРУЦКИЙ
(Полоцкий государственный университет)*

Приведены результаты исследования материалов из диффузионно-легированной стружки чугуна, их стойкости в условиях динамического, знакопеременного нагружения. Обоснован подход к анализу антифрикционных свойств материалов, при котором оценивается износ трибосопряжения в целом. Выявлены структуры покрытий, обладающих максимальной стойкостью к изнашиванию. Определены рациональные области использования разработанного покрытия. Установлено, что применение покрытия целесообразно в подшипниках скольжения, работающих при переменных нагрузках и возвратно-поступательном движении, а износостойкость подшипников на основе исследуемого материала сопоставима со стойкостью материалов на основе железа.

Для восстановления изношенных деталей используют современные способы нанесения покрытий, чаще всего применяют порошковые материалы, что способствует значительному повышению долговечности восстановленных деталей. Организация мероприятий по восстановлению изношенных деталей решает проблему обеспечения народного хозяйства запасными частями, повышает качество ремонта, а также снижает расход материальных и трудовых ресурсов.

Одна из наиболее сложных в изготовлении и ремонте деталей автомобилей – коленчатый вал двигателя внутреннего сгорания (ДВС), основной причиной достижения предельного состояния которого является износ коренных и шатунных шеек [2]. Среди наиболее универсальных методов восстановления изношенных поверхностей либо упрочнения вновь изготавливаемых деталей машин, работающих в условиях интенсивного изнашивания, газовая или плазменно-порошковая наплавка (ППН).

Основная часть. В качестве материала при ППН коленчатых валов зачастую используются износостойкие порошковые наплавочные материалы, в структуре которых содержатся высокотвёрдые (карбиды, бориды и т.д.) фазы. Среди порошковых наплавочных материалов, обладающих твердостью выше твердости абразива и стойкостью к абразивному износу, одними из наиболее употребляемых являются порошки на основе систем WC – Co и WC – TiC – Co, являющиеся основой твердых сплавов. Материалы этой серии отличаются высокой твердостью даже матричной составляющей и высокой стоимостью, что неизбежно приводит к удорожанию ремонта в целом. Как альтернатива уже известным порошкам видится создание композитного материала на основе отходов металлообработки. В качестве матричной основы предложено использовать отходы белого либо серого чугунов, в большом количестве имеющихся на ремонтных заводах республики. Затем предлагается к несущей основе интегрально добавлять легирующие элементы, необходимые в данном трибосопряжении. Таким образом, предложен принципиально новый подход к формированию антифрикционного материала на основе стружечных отходов, экономно легированных дополнительными элементами.

Одним из способов улучшения триботехнических свойств многокомпонентных материалов является подбор оптимального соотношения легирующих элементов. За базовую основу материала можно принимать не только дорогостоящие материалы с исходно высокими триботехническими свойствами, но и материалы, которые до последнего времени не относились к разряду антифрикционных, а в силу применения исходных порошковых компонентов, также можно применять отходы металлообрабатывающих производств. Следовательно, разработка материалов, обладающих быстрой прирабатываемостью, минимальным износом в паре трения при различных режимах нагружения, актуальна как при восстановлении, так и при упрочнении деталей.

Себестоимость такого порошка не будет превышать 70 % стоимости традиционного стального порошка. Применение диффузионного легирования порошков из металлоотходов открывает принципиально иные возможности синтеза износостойких и антифрикционных защитных покрытий [1; 3]. В связи с этим возникает задача регулирования содержания углерода в порошке.

Исходная стружка серого чугуна содержит 2,8...3,1 % углерода. Ранее выполненные исследования [7] свидетельствуют о том, что такое большое количество углерода в наплавочном порошке оказывает отрицательное влияние на триботехнические характеристики покрытий. Для повышения технологических характеристик получаемого наплавочного порошка также необходимо уменьшать содержание углерода [4]. Принципиально возможны два способа уменьшения содержания углерода в стружке серого чугуна: механическое измельчение с последующей магнитной сепарацией и диффузионное обезуглероживание.

При механическом измельчении графитные включения выкрашиваются из стальной матрицы пропорционально степени измельчения (табл. 1). Кроме степени измельчения стружки на количество остаточного углерода оказывает влияние размер и форма графитных включений. В анализируемом случае размеры графитных включений позволяют снизить количество углерода в стружке лишь до 2 %.

Дальнейшее уменьшение содержания углерода возможно только путем диффузионного обезуглероживания. Ранее полученные экспериментальные данные об ускорении процесса диффузионного легирования стальных порошков позволили предположить, что аналогичное ускорение возможно в случае диффузионного обезуглероживания чугуна.

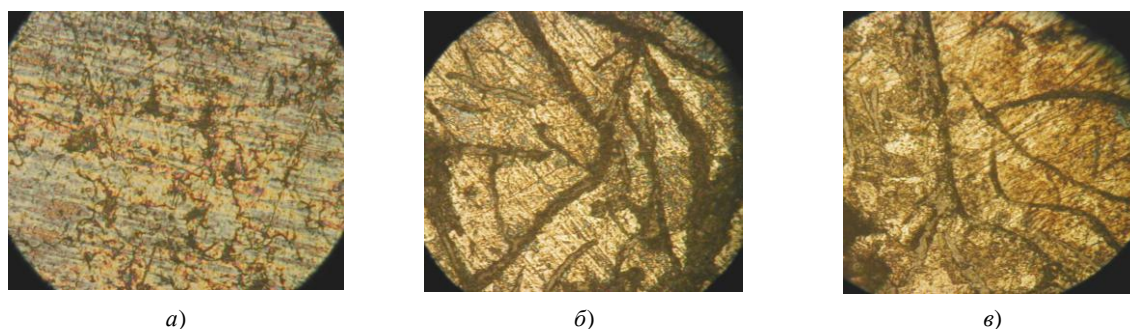
Таблица 1

Влияние степени измельчения стружки серого чугуна на содержание углерода

Фракция стружки, мкм	630...1000	400...630	315...400	200...315	160...200	100...160	63...100
Содержание С % по массе	3,130	2,986	2,873	2,250	2,219	2,200	2,190

При обезуглероживании чугуна в контролируемой газовой атмосфере вначале выгорают графитные включения, контактирующие с внешней поверхностью частиц. Дальнейшее обезуглероживание протекает по диффузионному механизму: растворение графита в аустените, диффузия атомов углерода к внешней поверхности частиц и их взаимодействие с газовой фазой.

Выполненные эксперименты показали, что структура получаемых порошков железа существенно зависит от режима процесса. При проведении высокотемпературного отжига порошка (рис. 1, а), свободно засыпанного в поддон из жаростойкой стали, на месте графитных включений в частицах железа образуются поры, повторяющие их форму и размер (рис. 1, б). Увеличение времени выдержки приводит к увеличению размеров пор на месте графитных включений, связанному со сфероидизацией пор (табл. 2).



а)

б)

в)

Рис. 1. Микроструктура стружки серого чугуна $\times 500$:

а – исходная стружка; б – обезуглероживание в неподвижном контейнере 920 °С, 5 ч

в – обезуглероживание во вращающемся контейнере 920 °С, 5 ч

Таблица 2

Результаты обезуглероживания стружки серого чугуна СЧ-20 в статической смеси в окислительной печной атмосфере

Режим обезуглероживания	Пикнометрическая плотность, г/см ³	Микротвердость металлической матрицы, МПа	Толщина графитных включений (пор на месте графита), мкм	Содержание углерода в порошке, % по массе
Исходная стружка	6,71	2090	5,282	2,7
920 °С, 1 ч	5,70	1830	5,952	1,82
920 °С, 2 ч	5,24	1670	5,236	0,816
920 °С, 3 ч	5,51	1920	5,334	0,868
920 °С, 4 ч	5,40	1770	5,966	0,641
920 °С, 5 ч	4,86	1520	6,63	0,396

Известно [7], что при аустенизации серого чугуна с шаровидным графитом на границе С/γFe образуется зазор в результате частичного растворения углерода, а при термоциклировании происходит рост пор и разбухание чугуна (рис. 2). Это связано с тем, что при охлаждении избыточный графит выделяется в виде тонкой пленки на внутренней поверхности поры, которая затем растет в сторону матрицы [4]. По-видимому, это связано с чрезвычайно низким коэффициентом самодиффузии в графите. Возникающие при этом напряжения в кристаллической решетке приводят к локальной пластической деформации по

механизму диффузионной ползучести: переползание дислокаций и возникновение потока вакансий, направленного в сторону графита. При большом числе циклов это в конечном итоге приводит к росту пор и, соответственно, к увеличению объема материала. По этой причине пикнометрическая плотность порошка в анализируемом случае уменьшается (см. табл. 2). При обезуглероживании чугунного порошка в печи с вращающимся контейнером экспериментально обнаружена иная картина, а именно схлопывание пор по мере растворения углерода в аустените (табл. 3). Вероятно, это связано с пластической деформацией частиц γ -Fe в процессе пересыпания порошка во время вращения реторты.

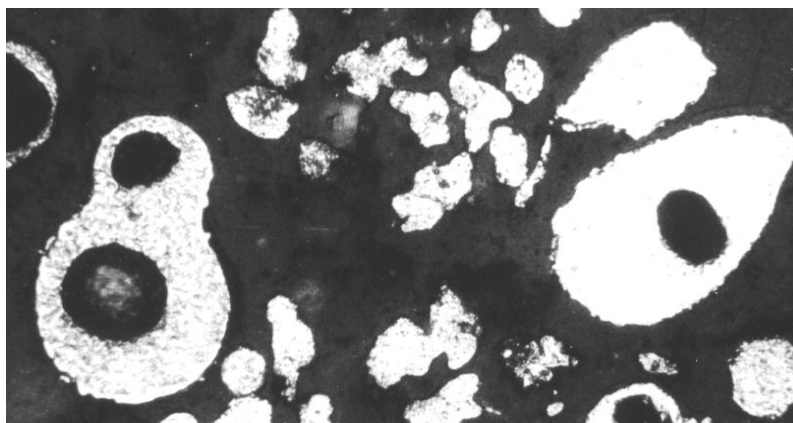


Рис. 2. Микроструктура диффузионно-легированной стружки серого чугуна СЧ-20, прикрепление медной частицы ($\times 250$)

Таблица 3

Результаты обезуглероживания стружки серого чугуна СЧ-20 во вращающемся контейнере в окислительной печной атмосфере

Режим обезуглероживания	Пикнометрическая плотность, г/см ³	Микротвердость металлической матрицы, МПа	Толщина графитных включений (пор на месте графита), мкм	Содержание углерода в порошке, % по массе
Исходная стружка	6,62	2090	5,282	2,7
920 °С, 1 ч	6,625	2470	4,704	2,75
920 °С, 2 ч	6,27	2090	4,17	2,625
920 °С, 3 ч	6,13	2510	4,278	2,6
920 °С, 4 ч	6,48	1990	4,542	2,68
920 °С, 5 ч	6,40	2130	4,11	2,64

В условиях пластической деформации, наряду с диффузионно-пластическим течением (механизм Набарро – Херинга – Лившица), в частице под действием сдвиговых напряжений происходит скольжение дислокаций и их размножение по механизму Франка – Рида. Образующиеся «свежие» краевые компоненты дислокационных петель способны действовать как источники/стоки вакансий. Поскольку при пересыпании частиц процесс деформации носит периодический характер, в этих условиях рост поры на границе C/γ -Fe не происходит, а имеет место ее «схлопывание» по мере растворения графита (рис. 1, в).

Проведенные замеры микротвердости основы при обезуглероживании в неподвижном контейнере (см. табл. 2) показывают, что при увеличении режима выдержки происходит обеднение матрицы углеродом. При динамическом обезуглероживании микротвердость основы практически не изменяется (см. табл. 3).

Пластическая деформация частиц во время процесса приводит к ускорению диффузии углерода в аустенит, о чем свидетельствуют повышение микротвердости матрицы и, соответственно, уменьшение доли углерода, непосредственно выгорающего из графита. Отсутствие пор на месте графитных включений способствует уменьшению площади контакта с окислительной печной атмосферой и, следовательно, протеканию процесса обезуглероживания.

Таким образом, искомая матрица и метод ее получения найдены. Затем, после анализа условий эксплуатации, для получения антифрикционного материала в матрицу дозированно введем легирующие элементы. Для увеличения стойкости к истиранию предложено ввести бор (для получения высокотвердых боридов), для увеличения антифрикционности предложено ввести медь [5; 7].

Для более глубокого понимания процесса совместного насыщения бором и медью проанализируем отдельно процессы борирования и насыщения медью.

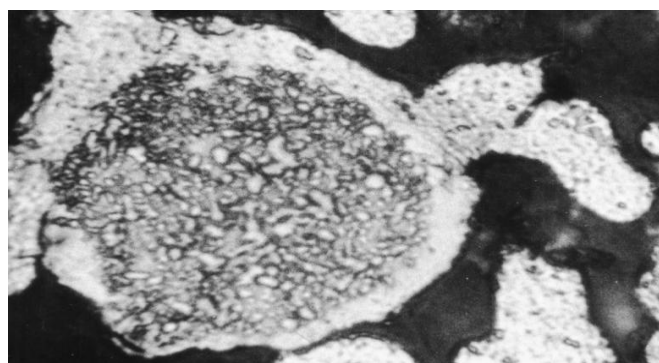
При борировании в подвижных смесях можно выделить несколько особенностей стадий процесса:

- вследствие циклического характера протекания деформационно-рекристаллизационных процессов на поверхности частиц чугуна идет интенсификация диффузионных процессов, в том числе и активных атомов бора в поверхностных слоях чугунных частиц;
- значительная интенсификация диффузионных процессов приводит к смене лимитирующей стадии процесса диффузионного легирования;
- процессы тепломассопереноса под воздействием движущихся частиц способствуют интенсификации сорбционных процессов на поверхности чугунных частиц;
- лимитирующей стадией процесса диффузионного легирования становятся сорбционные процессы на поверхности чугунных частиц.

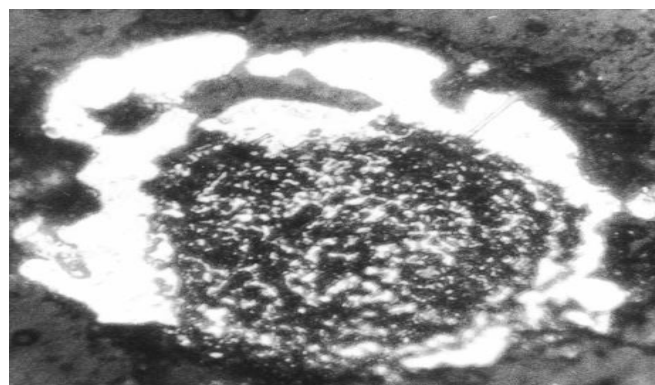
Теперь перейдем к рассмотрению процессов, происходящих при насыщении медью. При совместной обработке механического омеднения чугунных частиц не происходит. Однако необходимо отметить следующие особенности процесса:

- температура процесса близка к температуре плавления меди, вследствие этого повышается ее пластичность (значение предела текучести меди близко к нулю).
- при наличии деформационных процессов частицы меди стремятся закрепиться на поверхности частиц чугуна и «намазаться» (см. рис. 2).

Перейдем к рассмотрению процесса омеднения частиц чугуна с участием бора. Образование активных частиц бора, помимо вышеуказанного, ведет к предотвращению окисления частиц меди по поверхности и частиц чугуна. Это в свою очередь ведет к образованию поверхностей, близких по свойствам к ювенильным. Боридный же слой, образующийся на чугунной частице, повышает твердость поверхностного слоя при температуре обработки. Эти факторы способствуют тому, что при перемешивании подвижного слоя и возникновении деформаций частиц чугуна медные частицы закрепляются на неровностях поверхности чугунной частицы. В дальнейшем при интенсивном движении частиц при повышенной температуре происходит размазывание закрепившихся частиц по поверхности чугунной частицы (рис. 3).



а)



б)

Рис. 3. Стадии диффузионного легирования медью стружки чугуна СЧ 20:
 а – прилипание медных микрочастиц к поверхности стружки ($\times 1000$);
 б – распределение меди по поверхности стружки ($\times 500$)

При комплексном насыщении стружки бором и медью микротвердость сердцевины увеличилась до 2800...4600 МПа. Микротвердость боридной оболочки составила 10000...12000 МПа в присутствии припеченных частиц меди с микротвердостью 300...900 МПа (рис. 3, б).

В ходе экспериментов было отмечено, что припекание медных частиц проходило только при наличии бора в насыщающей смеси. Это связано с тем, что некоторое количество меди (до 0,1 % массы) растворяется в железе. Таким образом, формируется композиционная частица, имеющая боридную оболочку с припеченными к ней частицами меди.

При температурах, близких к температурам плавления меди, процесс протекает весьма интенсивно. Лимитирующей стадией в данном случае также являются сорбционные процессы на поверхности обрабатываемых частиц (рис. 4).

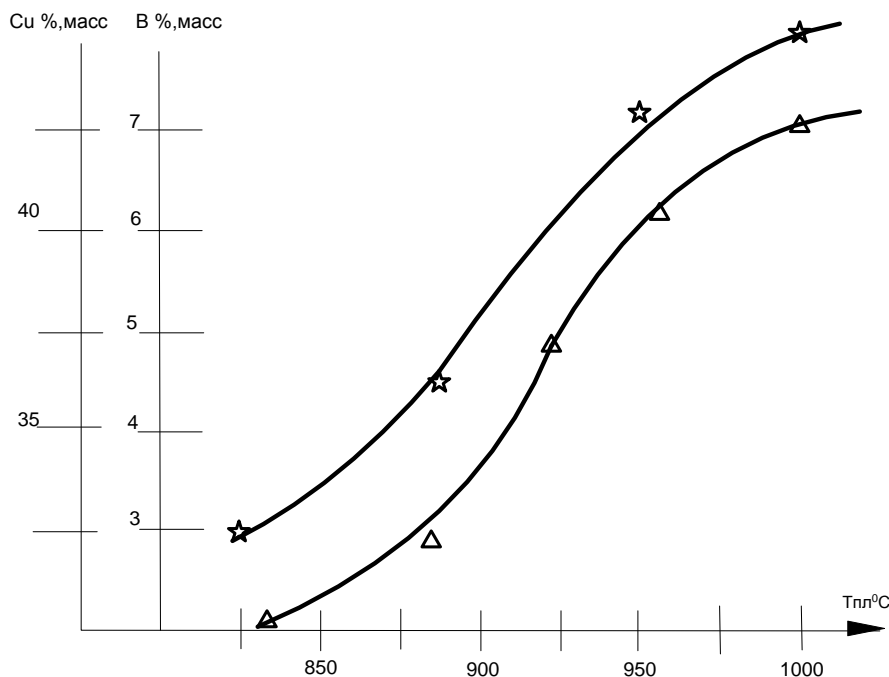


Рис. 4. Зависимость количества внедрившихся элементов от температуры обработки:
 Δ – процессы исследованные в [5]; \star – процессы насыщения чугуна бором и медью

Как видно из графиков, процессы в обоих случаях идентичны.

При постановке экспериментов по наплавке коленчатых валов ДВС использовалась установка УД-209 на основе переделанного токарного станка для наплавки, выпрямитель сварочный ВДУ-506.

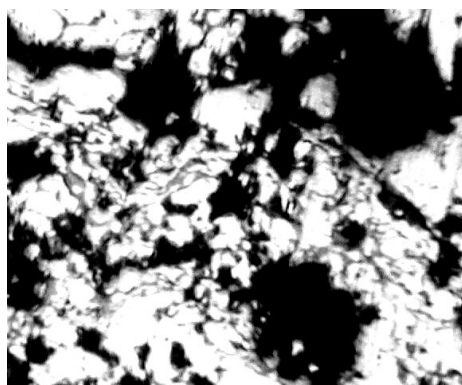


Рис. 5. Структура покрытия системы СЧ + В + Cu ($\times 250$)

Структура полученного покрытия приведена на рисунке 5. Наблюдается измельчение структурных составляющих, малое количество пор, локальные медные включения. На периферии пор и неметаллических включений обнаруживаются бористые фазы.

Макротвердость покрытия составляет порядка 110 НВ.

Распределение микротвердости по объему:

- до 500 МПа – 3,5 %;
- 500...1000 МПа – 53 %;
- 1000...1500 МПа – 18 %;
- 1500...2000 МПа – 15 %;
- 2000...2500 МПа – 10,5 %.

Явно прослеживается расположение меди между ламелями, что достигается конфигурацией исходной частицы порошка и играет важную роль в процессе триботехнического взаимодействия деталей.

Таким образом, формируется покрытие, соответствующее правилу Шарпи со строго регламентированными функциями для каждой фазы:

- крупнодисперсная фаза бористого феррита является основой покрытия;

- эвтектические фазы с упрочняющей сеткой бороцементита играют роль армирующего каркаса, причем содержание бора отличается от классического состава (3,8 %) в сторону уменьшения, что связано с высокими скоростями охлаждения покрытия;

- бориды входят как составляющие в бороцементит и непосредственно в узлы армирующего каркаса;

- медь придает покрытиям антифрикционные свойства, одновременно увеличивая прирабатываемость и теплопроводность.

Заключение. В результате проведенного исследования получены следующие результаты:

- показана возможность создания антифрикционного материала на основе металлоотходов с экономным добавлением легирующих элементов для придания необходимых свойств;

- выявлены регламентирующие физико-экономические факторы количественного содержания легирующего элемента в материале;

- выявлена и изучена взаимосвязь количества и качества структурных составляющих гетерогенного покрытия на прирабатываемость и износостойкость пары трения;

- обнаружен экстремальный характер влияния меди на трибологические показатели покрытия и трибопары в целом;

- определены рациональные области использования разработанного покрытия. Применение покрытия целесообразно в подшипниках скольжения, работающих при переменных нагрузках и возвратно-поступательном движении.

ЛИТЕРАТУРА

1. Engineering and functional materials. Proceeding of the Second International Scientific Conference, Lviv, 14 – 16 October, 1997. – Lviv, 1997. – P. 87 – 90.
2. Рекомендации по ремонту и реконструкции тяжело нагруженных узлов скольжения с использованием композиционных материалов / В.И. Жорник [и др.]. – Минск: ИТК НАНБ, 2000. – 88 с.
3. Гуляев, Б.Б. Синтез сплавов. Основные принципы. Выбор компонентов / Б.Б. Гуляев. – М.: Металлургия, 1984. – 158 с.
4. Ворошнин, Л.Г. Теория и практика получения защитных покрытий с помощью ХТО / Л.Г. Ворошнин, Ф.И. Пантелеенко, В.М. Константинов. – Минск: ФТИ; Новополоцк: ПГУ, 1999. – 133 с.
5. Сивый, С.Б. Исследование и разработка наплавочных материалов на медной основе для подшипников скольжения: дис. ... магистра техн. наук: 12.06.99 / С.Б. Сивый. – Новополоцк, 1999. – 116 с.
6. Современные материалы, оборудование и технологии упрочнения и восстановления деталей машин: темат. сб. – Новополоцк: ПГУ, 1999. – 370 с.
7. Константинов, В.М. Разработка альтернативного композиционного материала для восстановления и упрочнения антифрикционных деталей / В.М. Константинов, Ф.И. Пантелеенко, В.А. Фруцкий // PREZENT SI VIITOR IN DOMENIUL MECANIZARII SI ELECTRIFICARII AGRICULTURII: Simpozion Stiintific Jubiliar Cu Participate Internationala. Lucrari Stiintifice, Chisinau 19 – 20 octobrie 2000. – S. 214 – 217.
8. Порошковый материал для напыления износостойких покрытий: пат. № 16657 Респ. Беларусь, МРК 23С4/04 / В.П. Иванов, Т.В. Вигерина, А.П. Кастрюк, О.П. Штемпель, В.А. Фруцкий; заявитель Полоц. гос. ун-т; заявка № а 20110604; приоритет 10.05.2011.

Поступила 30.07.2012

COMPOSITE POWDER MATERIAL FOR RESTORATION OR HARDENING OF INTERNAL COMBUSTION ENGINE COMPONENTS

A. KASTRYUK, T. VIGERINA, O. SHTEMPEL, V. FRUTSKY

Materials from diffusion-alloyed cast-iron shaving, their resistance in terms of dynamic alternating stressing are examined. Approach to the analysis of antifriction properties of materials is justified, which aims at wear of tribounit estimation as a whole, structures of covers which have the highest possible resistance to wear are revealed. Rational areas of usage of the developed cover are defined. It is reasonable to use the cover in slide bearings, working under variable loads and seesaw motion. Wear resistance of slide bearings on the basis of the material under study is comparable with the resistance of materials on the basis of iron.

УДК 621.9.047.7:621.778.04

**ВЛИЯНИЕ ЭЛЕКТРОЛИТНО-ПЛАЗМЕННОЙ ОБРАБОТКИ
В ПРОЦЕССЕ ДЕФОРМАЦИОННОГО УПРОЧНЕНИЯ ВОЛОЧЕНИЕМ
НА ПРОЧНОСТНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ СТАЛИ 12Х18Н9**

*канд. техн. наук Ю.Г. АЛЕКСЕЕВ, д-р техн. наук, проф. Л.А. ИСАЕВИЧ,
А.Ю. КОРОЛЁВ, канд. техн. наук, доц. В.С. НИСС
(Белорусский национальный технический университет, Минск)*

Исследовано влияние промежуточной электролитно-плазменной обработки в процессе деформационного упрочнения волочением стали 12Х18Н9, широко применяемой для изготовления медицинских инструментов и имплантатов. Использовался базовый маршрут волочения, включающий семь проходов и обеспечивающий суммарное обжатие 80 %. Продолжительность промежуточной электролитно-плазменной обработки между проходами волочения составляла от 1 до 10 мин. Установлено, что применение электролитно-плазменной обработки между проходами волочения приводит к снижению величины растягивающих остаточных напряжений в поверхностном слое. Определена оптимальная продолжительность промежуточной электролитно-плазменной обработки, обеспечивающая сочетание высокого предела прочности и низких остаточных напряжений. Применение промежуточной электролитно-плазменной обработки в процессе деформационного упрочнения волочением обеспечивает повышение усталостной прочности материала благодаря снижению остаточных напряжений, плотности дислокаций, количества дефектов и инородных включений.

Введение. Ряд медицинских инструментов и имплантатов при эксплуатации подвергаются значительным знакопеременным нагрузкам. К таким изделиям относятся, прежде всего, имплантаты для травматологии (костные винты и пластины, стержни, спицы), эндопротезы тазобедренного сустава, инструменты-волноводы для ультразвукового разрушения тромбов внутри сосудов. Воздействие циклических напряжений при работе в организме приводит к их усталостному разрушению. Разрушение инструментов и имплантатов внутри организма вызывает тяжелые последствия, необходимость проведения срочных внеплановых операций, а в некоторых случаях внезапное разрушение может привести к летальному исходу. Поэтому к материалам для изготовления таких изделий предъявляются высокие требования по прочностным характеристикам (предел прочности, предел выносливости). Для изготовления медицинских инструментов и имплантатов наиболее часто применяют нержавеющие стали аустенитного класса в виде прутков различного диаметра, получаемых волочением. В деформационно-упрочненном состоянии такие стали имеют предел прочности до 1600...1700 МПа.

Основным недостатком заготовок, получаемых волочением, является наличие неблагоприятных растягивающих остаточных напряжений в поверхностных слоях материала, приводящих к значительному снижению усталостной прочности изделий, работающих в условиях циклических нагрузжений. Волочение также сопровождается появлением микро- и макродефектов, снижающих прочностные характеристики материала. Дефекты поверхности проявляются в виде поперечных складок, возникающих после каждого прохода волочения, которые в последующем становятся центрами развития микротрещин и царапин, продуктов износа инструмента, скоплений дислокаций, являющихся концентраторами напряжений и снижающих усталостную прочность материала.

Для удаления поверхностных дефектов и снижения величины остаточных напряжений предложен метод получения заготовок, основанный на волочении с применением промежуточной электролитно-плазменной обработки между каждым проходом. Электролитно-плазменная обработка (ЭПО) – способ обработки в электролитах при напряжениях 250...320 В, широко применяемый для очистки поверхности, снижения шероховатости и снятия заусенцев на изделиях, изготовленных из различных металлических материалов. Метод основан на удалении металла за счет плазменных разрядов, возникающих в парогазовой оболочке, образующейся вокруг обрабатываемой поверхности.

В работах [1; 2] проведены исследования влияния ЭПО на структуру и свойства поверхностного слоя деформированных аустенитных нержавеющих сталей. В результате проведенных исследований установлено, что кроме снижения шероховатости, ЭПО приводит также к модификации поверхности, которая выражается в изменении фазового состава с уменьшением содержания мартенситной фазы и увеличением содержания аустенитной фазы, снижением микротвердости поверхностного слоя толщиной до 30 мкм, снижением плотности дислокаций. На основании полученных результатов сделано предположение о том, что применение ЭПО между проходами волочения при деформационном упрочнении заготовок может обеспечить повышение усталостной прочности благодаря снижению остаточных напряжений в поверхностном слое и удалению дефектных поверхностных слоев, формирующихся при волочении.

Методы проведения исследований. Для подготовки образцов для исследований на основании рекомендаций [3] разработан базовый маршрут волочения, включающий семь проходов и обеспечивающий суммарное обжатие $\delta_{\text{сум.}} = 80\%$. В качестве исходных заготовок использовались прутки из стали 12Х18Н9 диаметром 4 мм и длиной 200 мм, разупрочненные закалкой при температуре 1100 °С с охлаждением в воде. Разработанный маршрут волочения приведен в таблице 1.

Таблица 1

Маршрут волочения для подготовки образцов

№ перехода	Исходный диаметр $d_{\text{исх.}}$, мм	Конечный диаметр, $d_{\text{кон.}}$, мм	Единичное обжатие, $\delta_{\text{ед.}}$	Суммарное обжатие, $\delta_{\text{сум.}}$	Коэффициент вытяжки, K
1	3,98	3,55	0,20	0,20	1,26
2	3,55	3,15	0,21	0,37	1,27
3	3,15	2,82	0,20	0,50	1,25
4	2,82	2,50	0,21	0,61	1,27
5	2,50	2,24	0,20	0,68	1,25
6	2,24	2,00	0,20	0,75	1,25
7	2,00	1,80	0,19	0,80	1,23

Образцы готовились методом обычного волочения, а также методом волочения с промежуточной ЭПО продолжительностью 1, 3, 5 и 10 мин. При ЭПО величина размерного съема на диаметр составляла 0,005, 0,015, 0,025 и 0,05 мм соответственно.

Для волочения согласно разработанному базовому маршруту использовался цепной волочильный стан. Скорость волочения составляла 20 м/мин. Угол рабочего конуса используемых волок составлял 8 градусов, материал волок – сплав ВК6 [4]. В качестве смазки использовалось натриевое мыло. Промежуточная ЭПО выполнялась в 4-процентном растворе сульфата аммония, при рабочем напряжении 300 В и температуре электролита 80 °С.

Исследование влияния ЭПО между проходами волочения на распределение остаточных напряжений в прутках проводилось методом замера прогибов [5]. При этом использовалась теория стержней, основанная на гипотезе плоских сечений. Остаточное напряженное состояние предполагалось одноосным. Для определения остаточных напряжений постепенно удалялся слой материала $ABCD$ (рис. 1), находящийся в зоне постоянных по длине стержня напряжений. В цельном стержне они действуют по граням AB и CD .

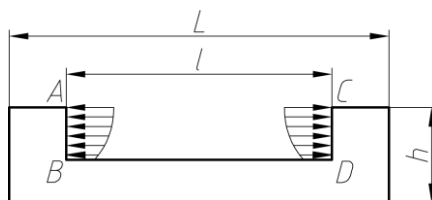


Рис. 1. Схема выявления остаточных напряжений путём последовательного удаления слоёв металла

Для определения остаточных напряжений в образцах методом замера прогибов круглый профиль приводился к прямоугольному путем сошлифовывания лысок (рис. 2). Шлифование лысок на круглом профиле, а также последовательное удаление плоских слоёв с полученного приведенного профиля осуществлялось на плоскошлифовальном станке с применением специальной технологической оснастки.

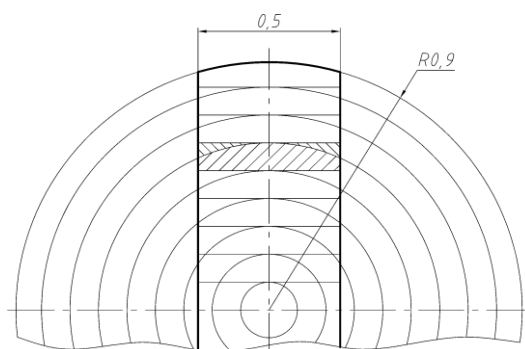


Рис. 2. Приведение круглого профиля к прямоугольному

После формирования прямоугольного профиля с целью дальнейшего определения величины прогиба на одну из сторон каждого образца при помощи микротвердомера наносились метки. Для измерения величины прогиба использовался инструментальный микроскоп. Схема нанесения меток и схема измерения прогиба приведены на рисунке 3. Величина прогиба равна полусумме отклонений точек *A* и *C* от точки *B*:

$$f = \frac{1}{2}(f_A + f_C). \quad (1)$$

После нанесения меток для каждой группы образцов выполнялось последовательное удаление слоёв. Толщина удаленных слоёв для каждого из образцов приведена в таблице 2.

Таблица 2

Толщина удаленных слоёв

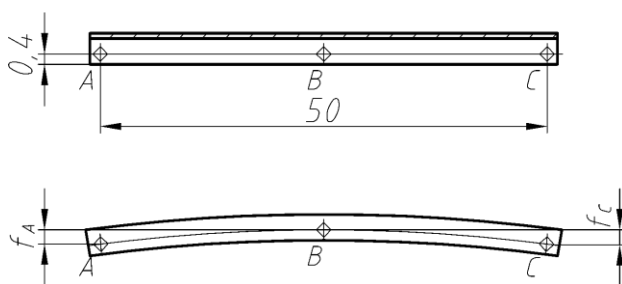


Рис. 3. Схема нанесения меток для измерения прогибов

№ образца в группе	Толщина уделённого слоя, мм
0	0
1	0,04
2	0,13
3	0,20
4	0,31
5	0,43
6	0,59
7	0,69
8	0,80
9	0,90

Далее по величине прогиба рассчитывались значения остаточных напряжений по сечению заготовки. Измерение предела прочности образцов проводили растяжением прутков на универсальной испытательной машине.

Для создания циклической нагрузки при испытаниях на усталостную прочность использовался ультразвуковой генератор мощностью 80 Вт, позволяющий генерировать колебания частотой от 22 до 28 кГц с амплитудой до 180 мкм. Для подключения к ультразвуковому преобразователю образцы длиной 250 мм припаивались припоем ПСр60 к переходному винту, изготовленному из стали 12Х18Н9. Оценка влияния ЭПО на усталостную прочность материала проводилась путём сравнения усталостной прочности образцов, полученных волочением и волочением с промежуточной ЭПО.

Испытания на усталостную прочность заключались в определении числа циклов, приводящих к разрушению образцов при заданных величинах напряжений и в определении предельного напряжения, при котором не происходит разрушения при максимальном числе циклов нагружения (база испытаний). Для стали это число принимается равным $N = 1 \cdot 10^7$. Испытания проводились до базы, предел выносливости определялся как наибольшее значение максимального напряжения цикла, при котором образец выдерживал базовое число циклов без разрушения [6]. Зависимость максимальных напряжений, приводящих к разрушению образца при усталостных испытаниях, от числа циклов нагружения до момента разрушения представляет собой кривую, называемую кривой усталости, или кривой Велера [7].

Величина напряжений, возникающих в образцах, при передаче ультразвуковых колебаний определялась по формуле:

$$\sigma = A \frac{2\pi f E}{c}, \text{ МПа}, \quad (2)$$

где A – амплитуда ультразвуковых колебаний, мм; f – частота ультразвуковых колебаний, кГц; E – модуль упругости материала, МПа (для стали 12Х18Н9 принимается равным $1,96 \cdot 10^5$ МПа); c – скорость звука в материале, мм/с (для стали 12Х18Н9 принимается равной $5,17 \cdot 10^6$ мм/с).

Испытания проводились на частоте $f = 25000$ Гц. Для каждого из уровней нагружения испытывались по три образца. Испытания начинались при амплитуде колебаний 180 мкм. Далее амплитуда колебаний постепенно уменьшалась с шагом 20 мкм до тех пор, пока не был достигнут уровень, при котором образец не разрушался после числа циклов, равного базе испытаний.

Результаты и их обсуждение. На основании измеренных значений величин прогибов выполнены расчеты, позволившие определить значения остаточных напряжений, действующих в кольцевых сечениях образцов, полученных волочением, а также волочением с промежуточной ЭПО продолжительностью

1, 3, 5 и 10 мин. На основании аппроксимации полученных данных построены зависимости, характеризующие распределение остаточных напряжений по сечению образцов (рис. 4).

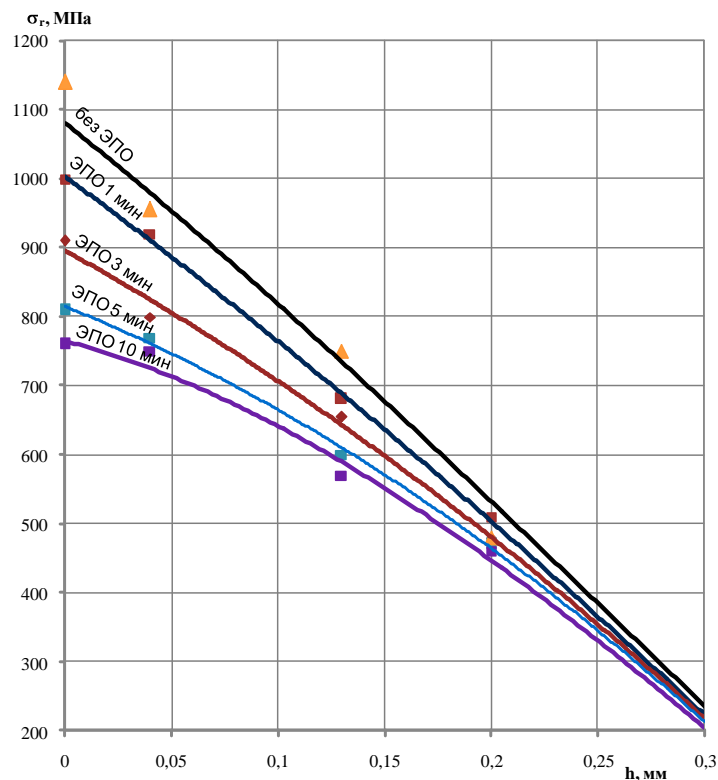


Рис. 4. Распределение остаточных напряжений (σ_r) в поверхностном слое образцов, полученных волочением с различной продолжительностью промежуточной ЭПО

Анализ полученных данных показывает, что в результате применения промежуточной ЭПО между проходами волочения в поверхностных слоях глубиной до 0,3 мм происходит снижение величины остаточных напряжений относительно значений остаточных напряжений в образцах, полученных волочением без ЭПО. Из рисунка 4 следует, что чем больше продолжительность ЭПО, тем больше снижаются остаточные напряжения. Наиболее интенсивное снижение остаточных напряжений происходит при промежуточной ЭПО продолжительностью до 3 мин.

Снижение остаточных напряжений в результате применения промежуточной ЭПО между проходами волочения может быть обусловлено следующими явлениями:

- удалением между проходами волочения слоя с повышенной плотностью дислокаций, инородными включениями, продуктами износа инструмента;
- сглаживанием или удалением продольных складок на заготовке, которые впоследствии являются центрами усталостного разрушения;
- снижением коэффициента трения, обеспечивающего снижение напряжений в зоне контактного трения;
- разупрочнением поверхностного слоя.

В результате испытаний полученных образцов на разрыв установлено, что, несмотря на снижение суммарной степени обжатия из-за удаления поверхностных слоёв, промежуточная ЭПО не приводит к снижению предела прочности материала. Кроме того, при ЭПО продолжительностью до 3 мин наблюдается рост предела прочности (рис. 5, кривая 1) с максимальным значением 1480 МПа. Повышение предела прочности образцов на разрыв при промежуточной ЭПО продолжительностью до 3 мин объясняется уменьшением величины неблагоприятных растягивающих остаточных напряжений в периферийных слоях. Также причиной повышения предела прочности является уменьшение плотности дефектов в структуре материала в результате применения ЭПО между проходами волочения.

С дальнейшим увеличением продолжительности промежуточной ЭПО предел прочности постепенно снижается и при 10 мин достигает значения 1250 МПа. Это связано с разупрочнением поверхности при ЭПО и недостаточной степенью деформационного упрочнения из-за существенного снижения суммарной степени обжатия в результате удаления материала в процессе промежуточной ЭПО.

На рисунке 5 также представлена зависимость величины остаточных напряжений в поверхностном слое от продолжительности промежуточной ЭПО (кривая 2).

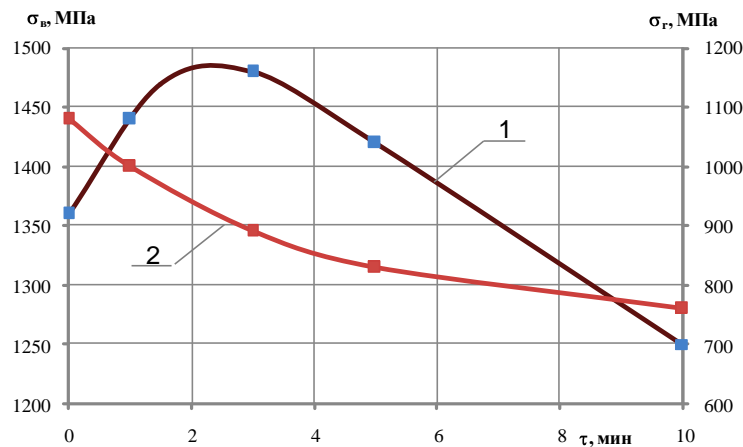


Рис. 5. Зависимость предела прочности (σ_b) и остаточных напряжений в поверхностном слое (σ_r) от продолжительности промежуточной ЭПО (τ)

Из представленной зависимости следует, что наиболее интенсивное снижение остаточных напряжений в материале происходит при промежуточной ЭПО продолжительностью до 5 мин. Электролитно-плазменная обработка продолжительностью более 5 мин характеризуется низкой интенсивностью снижения остаточных напряжений. Для обеспечения высокой прочности и низких остаточных напряжений наиболее оптимальным является режим волочения, включающий промежуточную ЭПО между проходами волочения продолжительностью 3...5 мин. При этом обеспечивается предел прочности материала 1420...1480 МПа, а величина растягивающих остаточных в поверхностном слое снижается до 820...880 МПа.

Испытаниям на усталостную прочность подвергались образцы, полученные волочением без ЭПО и волочением с промежуточной ЭПО продолжительностью 5 мин. На основании данных, полученных по результатам испытаний, построены кривые усталости в логарифмической системе координат (рис. 6).

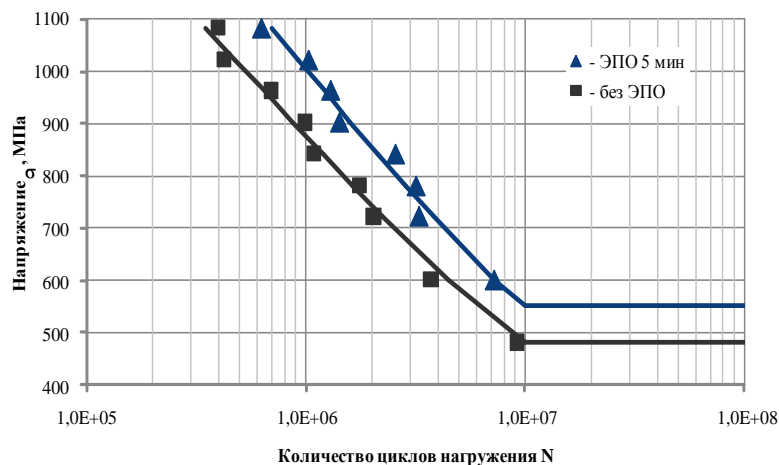


Рис. 6. Кривые усталости образцов после волочения без ЭПО и после волочения с ЭПО

Результаты испытаний усталостной прочности образцов после волочения и после волочения с промежуточной ЭПО продолжительностью 5 мин показывают, что предел выносливости после волочения с ЭПО 12,5 % выше, чем после обычного волочения (предел выносливости после волочения составлял около 480 МПа, а после волочения с ЭПО – 540 МПа).

Повышение предела выносливости при волочении с применением промежуточной ЭПО связано прежде всего со снижением величины растягивающих остаточных напряжений в периферийных слоях. Кроме того, повышение предела выносливости связано с уменьшением количества дефектов, являющихся концентраторами напряжений, и повышением качества поверхностного слоя в результате применения промежуточной ЭПО.

Заключение. Применение ЭПО между проходами волочения является эффективным методом снижения величины неблагоприятных растягивающих остаточных напряжений в поверхностном слое толщиной до 0,3 мм при конечном диаметре получаемого прутка 1,8 мм. Чем больше продолжительность промежуточной ЭПО, тем ниже остаточные напряжения в поверхностном слое. Промежуточная ЭПО продолжительностью 10 мин приводит к снижению величины растягивающих остаточных напряжений на поверхности прутка с 1080 до 770 МПа. Однако наиболее существенный эффект снижения остаточных напряжений наблюдается при продолжительности промежуточной ЭПО до 3 мин.

Установлено, что для обеспечения сочетания высокой прочности и низких остаточных напряжений продолжительность ЭПО между проходами волочения должна составлять 3...5 мин. При этом достигается предел прочности 1420...1480 МПа, а величина растягивающих остаточных напряжений в поверхностном слое снижается до 820...880 МПа.

Проведенные исследования эксплуатационных характеристик образцов, полученных методом волочения с промежуточной ЭПО, показали, что применение ЭПО продолжительностью 5 мин обеспечивает повышение усталостной прочности материала с 480 до 540 МПа за счет снижения остаточных напряжений, плотности дислокаций, количества дефектов и инородных включений.

Результаты исследований использованы при изготовлении заготовок длинномерных ультразвуковых инструментов-волноводов малого диаметра, применяемых для разрушения тромбов внутри сосудов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Влияние электролитно-плазменной обработки на изменение характеристик поверхностного слоя коррозионно-стойких аустенитных сталей / А.Ю. Королёв [и др.] // Инженерия поверхности: сб. науч. ст. междунар. науч.-техн. конф., Брест, 27 – 27 окт. 2007 г.; Брест. гос. техн. ун-т; редкол.: В.М. Хвиевич [и др.]. – Брест, 2007. – С. 77 – 81.
2. Влияние электролитно-плазменной обработки на структуру и свойства поверхностного слоя стали 12X18H10T / И.В. Фомихина [и др.] // Весці Нац. акад. навук Беларусі. Сер. фіз.-тэхн. навук. – 2008. – № 3. – С. 24 – 29.
3. Горловский, М.Б. Справочник волочильщика проволоки / М.Б. Горловский, В.Н. Меркачёв. – М.: Металлургия, 1993. – 256 с.
4. Колмогоров, Г.Л. Инструмент для волочения / Г.Л. Колмогоров, С.И. Орлов, В.Ю. Шевляков. – М.: Металлургия, 1992. – 144 с.
5. Биргер, И.А. Остаточные напряжения / И.А. Биргер. – М.: ГИТТЛ, 1963. – 178 с.
6. Циммерман, Р. Металлургия и материаловедение: справ. / Р. Циммерман, К. Гюнтер. – М.: Металлургия, 1982. – 480 с.
7. Волков, С.С. Расчет и конструирование ультразвуковых сварочных машин / С.С. Волков; под ред. Н.М. Жигулёва. – М.: ВЦИИИ, 1974. – 104 с.

Поступила 15.05.2012

THE EFFECT OF ELECTROLYTE-PLASMA TREATMENT IN THE PROCESS OF DEFORMATIVE HARDENING BY DRAWING ON STRENGTH PROPERTIES OF STEEL 12X18H9

Y. ALEKSEEV, L. ISAEVICH, A. KOROLYOV, V. NISS

The effect of electrolyte-plasma treatment in the process of deformative hardening by drawing of steel 12X18H9 widely used for medical tools and implants manufacturing was investigated. The basic drawing sequence which consists of seven passes and provides the total reduction ratio of 80 % was used. The duration of the intermediate electrolyte-plasma treatment between passes of drawing was from 1 to 10 min. The studies found that the use of electrolytic-plasma treatment between passes of drawing leads to a decrease in the tensile residual stresses in the surface layer. The optimal duration of the intermediate electrolyte-plasma treatment, providing a combination of high tensile strength and low residual stresses, was determined. It is established that the use of an intermediate electrolyte-plasma treatment in the process of deformative hardening by drawing enhances the fatigue strength of the material by reducing the residual stress, dislocation density, the number of defects and foreign inclusions.

УДК 621.785.5

**ПОВЫШЕНИЕ СТОЙКОСТИ СВЕРЛ ИЗ БЫСТРОРЕЖУЩЕЙ СТАЛИ
НИЗКОТЕМПЕРАТУРНОЙ НИТРОЦЕМЕНТАЦИЕЙ**

*канд. техн. наук, доц. А.М. ДОЛГИХ
(Полоцкий государственный университет)*

Исследованы некоторые характеристики и эксплуатационная стойкость диффузионных защитных слоев, полученных методом низкотемпературной нитроцементации быстрорежущих сталей. Проведен замер таких важных для характеристики процесса резания при сверлении параметров, как величина крутящего момента и осевой составляющей силы резания при сверлении, величины износа по задней поверхности и ленточке. Для определения эксплуатационной стойкости нитроцементованных покрытий, полученных в продуктах пиролиза карбамида, испытания были проведены в соответствии с гостированной методикой и применением метода математического планирования эксперимента. Представленные материалы имеют практическое применение, предложенные составы и технология нанесения защитных покрытий методом химико-термической обработки могут быть рекомендованы в качестве процессов, значительно улучшающих эксплуатационные показатели стойкости и надежности работы спиральных сверл.

Одним из проблемных металлорежущих инструментов, работающих в наиболее сложных условиях, являются спиральные сверла [1; 2].

Низкотемпературная нитроцементация в продуктах пиролиза карбамида известна как процесс, стабильно повышающий эксплуатационные показатели работы металлорежущего инструмента, в том числе и спиральных сверл, изготовленных из быстрорежущей стали Р6М5. Низкотемпературная нитроцементация является одним из признанных методов химико-термической обработки (термодиффузионной обработки), которая радикальным образом изменяет состав и физико-химические свойства поверхностных слоев упрочняемых режущих инструментов, что позволяет значительно повысить их эксплуатационные свойства, в том числе и стойкость.

Необходимость проведения исследований, изучения закономерностей формирования состава и свойств полученных диффузионных слоев и внедрения в промышленность одного из наиболее перспективных процессов химико-термической обработки (газовой нитроцементации) очевидна.

Материалы и методика эксперимента. Технология и оборудование для проведения процесса газовой нитроцементации (карбонитрации) просты и могут быть реализованы в любом термическом подразделении на стандартном оборудовании. Металлорежущий инструмент после стандартного цикла механической и термической обработок промывают от масла и загрязнений. Затем помещают в рабочую зону печи, нагревают до температуры проведения процесса и выдерживают в течение определенного времени в зависимости от вида инструмента, насыщаемой стали и требуемой толщины упрочненного слоя. Для металлорежущих спиральных сверл продолжительность процесса карбонитрации предварительно рассчитывалась как 1 мин на 1 мм диаметра или толщины инструмента, но не более 25...30 мин. По завершении процесса производят охлаждение на спокойном воздухе или в окислирующем расплаве (в специальной ванне окислирования) с последующей промывкой от солей и сушкой, что обеспечивает также внешний товарный вид инструмента с коррозионно-стойкой (воронёной) маслянисто-черной поверхностью.

Структура карбонитрированной быстрорежущей стали обеспечивает высокий уровень эксплуатационных свойств инструмента, что приближает его по стойкости к твердосплавным материалам. После выдержки в течение 15 мин на поверхности быстрорежущей стали Р6М5 наблюдается появление тонкого нетравящегося слоя карбонитридов с кристаллической решеткой типа нитрида ($Me_{2-3}N$) с гексагональной структурой.

По мере удаления от поверхности твердость этой зоны упрочнения плавно убывает от максимальных значений, отвечающих зоне, состоящей из карбонитридов, до твердости закаленной и отпущенной сердцевины инструмента.

Важным качеством карбонитрированной быстрорежущей стали Р6М5 является ее способность сохранять высокие значения твердости поверхностного слоя при последующих после карбонитрации нагревах вплоть до интервала температур 650...670 °С. Обычно такая обработка проводится при 560...580 °С, т.е. при температуре, которая немного ниже минимальной температуры существования γ -фазы в системе Fe – N. Нитроцементация существенно повышает предел выносливости, причем в большей степени, чем цементация. В связи с этим сжимающие напряжения создаются в цианированном слое лишь на некотором расстоянии от поверхности, что приводит к снижению предела выносливости стали.

После проведения процессов нитроцементации визуально оценивали качество поверхности образцов. Анализ микроструктуры и измерение толщины слоя проводили на металлографических микроскопах при 100...1000-кратных увеличениях на поперечных и косых шлифах по стандартной методике. Микротвердость поверхностного слоя замеряли на приборе ПМТ-5 по методике, изложенной в ГОСТ 9450 при нагрузках на индентор, составляющих соответственно 0,49 и 0,98 Н.

Шероховатость поверхности образцов до и после проведения процесса нитроцементации оценивали на профилографе-профилометре модели 201 завода «Калибр» согласно ГОСТ 2789.

Режимы резания для проведения сравнительных стойкостных испытаний рассчитывали по стандартной методике [6; 7].

Сверло диаметром 6,9 мм, изготовленное из быстрорежущей стали Р6М5, ГОСТ 19265-73.

Обрабатываемый материал – среднеуглеродистая сталь 40Х.

Подача была выбрана из таблицы [7] исходя из критерия прочности сверла: $S = 0,15 \dots 0,2$ (мм/об).

Поправочный коэффициент на недостаточную жесткость системы СПИЗ (станок – приспособление – инструмент – заготовка) составляет при средней жесткости $K_s + 0,75S = 0,2 \cdot 0,75 = 0,15$ (мм/об) [7].

Скорость резания при сверлении определяется по формуле [7]:

$$v = \frac{C_v \cdot D \cdot q_v}{T_{mv} \cdot S_{yv}} \cdot K_v,$$

где D – диаметр сверла (6,9 мм); T – принятый период стойкости спирального сверла (25 мин); S – подача (0,15 мм/об); K_v – общий поправочный коэффициент на скорость резания, учитывающий фактические условия резания.

В последнее время процесс низкотемпературной газовой нитроцементации получил признание как один из эффективных способов повышения эксплуатационной стойкости металлорежущего инструмента, изготовленного из быстрорежущей стали. С точки зрения стабильности результатов насыщения и простоты реализации процесса в лабораторных и производственных условиях выбрана низкотемпературная газовая нитроцементация в продуктах разложения карбамида. Интервал температур проведения нитроцементации составляет 520...540 °С, продолжительность – 20...40 мин. При этом на поверхности спиральных сверл, изготовленных из быстрорежущей стали марки Р6М5, формируется слой толщиной 2...3 мкм, состоящий в основном из карбонитридов и имеющий твердость по Виккерсу 1200 единиц.

Исследования проводили на сверлах спиральных с цилиндрическим хвостовиком по ГОСТ 10902-77 диаметром 6,9 мм, изготовленных из стали Р6М5 ГОСТ 19265. В качестве критериев износа приняты величины износов по задней поверхности и ленточке. Обрабатываемый материал – среднеуглеродистая сталь 40Х ГОСТ 4345. Расчет режимов резания произведен по стандартной методике и дает следующие значения: подача – 0,15 мм/об; скорость резания – 21,7 м/мин.

Для замера величин крутящего момента и осевой составляющей силы резания при сверлении использовали комплекс, состоящий из универсально-динамометрической головки УДМ-600, тензометрического усилителя ТА-5, стабилизатора напряжения и блока измерительных приборов.

При проведении экспериментов с целью оптимизации эксплуатационных свойств спиральных сверл применяли метод математического планирования эксперимента. Принято три уровня. При этом в таблице в кодированном виде верхний уровень обозначается как +1, нижний уровень –1, основной – 0.

В качестве независимых переменных были приняты: скорость резания X_3 (м/мин); величина подачи X_2 (мм/об) и время проведения процесса нитроцементации X_1 (мин). В качестве выходных параметров регистрировались: значения величин износа по задней поверхности (V_3) и ленточке (V_4), момент крутящий (V_1), осевая составляющая силы резания (V_2).

Основная часть. Реализованные матрицы планирования эксперимента для сверл из быстрорежущей стали с покрытием и без покрытия представлены соответственно в таблицах 1 и 2.

Общий вид уравнения, описывающего зависимость параметра (обозначенного P) от исследуемых факторов (T, S, V):

$$Lg(P) = K_1 + K_2 Lg(T) + K_3 Lg(S) + K_4 Lg(V) + K_5 Lg(T) Lg(S) + K_6 Lg(S) Lg(V) + K_7 Lg(T) Lg(V) + K_8 Lg(T) Lg(S) Lg(V).$$

Зафиксированы значительные изменения в величинах коэффициентов при однородных членах полученной математической модели, в ряде случаев изменение знака показывает, что характеристики процесса резания инструментом с нанесенным нитроцементованным слоем и инструментом без покрытия различны.

После получения результатов эксперимента, реализованных на всех уровнях, и расчета коэффициентов уравнения регрессии (табл. 3, 4) проводят оптимизацию процесса нитроцементации с целью повышения стойкости сверл относительно основного уровня методом крутого восхождения по градиенту

построенной модели. При этом методе движение к области оптимума совершается по кратчайшему пути. Наиболее короткий путь к вершине поверхности отклика – движение в направлении градиента функции отклика. Изменяя уровни факторов пропорционально значениям коэффициентов регрессии, осуществляют движение в направлении градиента функции отклика по самому крутому пути.

Таблица 1

Матрица планирования эксперимента 2^3 для сверл, изготовленных из быстрорежущей стали Р6М5 без покрытия

№	X_1 T , мин	X_2 S , мм/об	X_3 V , м/мин	Y_1 $M_{кр}$, Н·м	Y_2 P_o , Н	Y_3 I_z , мкм	Y_4 I_l , мкм
1	40	0,2	1000	3,76	2255	290	70
2	20	0,2	1000	4,31	2076	230	130
3	40	0,1	1000	4,87	1217	205	91
4	20	0,1	1000	5,31	2148	170	64
5	40	0,2	500	4,54	2255	270	95
6	20	0,2	500	4,76	1432	270	99
7	40	0,1	500	5,31	816	230	50
8	20	0,1	500	5,7	966	201	71
<i>Основной уровень</i>							
9	30	0,14	710	3,54	1403	117	73
10	30	0,14	710	3,32	930	171	80,4
11	30	0,14	710	3,42	1381	175	82

Таблица 2

Матрица планирования эксперимента 2^3 для сверл, изготовленных из быстрорежущей стали Р6М5 с нанесенным покрытием (нитроцементацией)

№	X_1 T , мин	X_2 S , мм/об	X_3 V , м/мин	Y_1 $M_{кр}$, Н, м	Y_2 P_o , Н	Y_3 I_z , мкм	Y_4 I_l , мкм
1	40	0,2	1000	4,87	916	142	33
2	20	0,2	1000	5,75	1074	104	50
3	40	0,1	1000	5,09	673	95	40
4	20	0,1	1000	4,42	1031	100	37
5	40	0,2	500	3,76	723	166	65
6	20	0,2	500	4,2	744	115	69
7	40	0,1	500	5,53	429	99	33
8	20	0,1	500	3,54	615	117	42
<i>Основной уровень</i>							
9	30	0,14	710	2,65	658	87	42
10	30	0,14	710	2,54	501	99	41
11	30	0,14	710	2,54	558	95	39

Таблица 3

Коэффициенты полинома второй степени для сверл, изготовленных из быстрорежущей стали Р6М5 без покрытия

Коэффициенты	$M_{кр}$	P_o	I_z	I_l
K_1	-67,59	-111,59	12,13	-49,03
K_2	70,27	116,7	-8,83	46,9
K_3	-99,02	-105,69	8,68	-60,88
K_4	25,82	37,24	-3,31	18,67
K_5	98,97	111,78	-8,35	56,5
K_6	36,52	34,17	-2,82	22,18
K_7	-26,02	-38,13	3,10	-17,01
K_8	-36,61	-36,22	2,85	-20,38

Для того чтобы найти соответствие между показателями регистрирующего прибора и реальным значением величины силы, проводят тарирование. Для этого на динамометр воздействуют силой, величина которой заранее известна, и фиксируют показания регистрирующего устройства.

Повторив такой прием при нескольких значениях нагружающей силы, строят тарировочный график, по которому в дальнейшем можно будет проводить обратный пересчет.

Таблица 4

Коэффициенты полинома второй степени для сверл, изготовленных из быстрорежущей стали Р6М5, с покрытием (нитроцементацией)

Коэффициенты	$M_{кр}$	P_o	I_3	I_4
K_1	11,9	-3,88	-8,72	-27,67
K_2	-8,83	4,62	8,18	25,39
K_3	16,56	-3,36	-13,66	-35,61
K_4	-2,52	1,74	2,87	10,87
K_5	-13,44	4,28	9,92	29,87
K_6	-4,75	0,58	3,82	13,04
K_7	2,52	-1,31	-2,17	-9,21
K_8	3,99	-1,00	-2,72	-10,74

Заключение. Низкотемпературная нитроцементация сверл из быстрорежущей стали Р6М5 положительно сказывается на параметрах процесса резания – величины крутящего момента и осевой составляющей силы резания при сверлении уменьшаются соответственно в 1,4 и 1,5 раза, что позволяет значительно снизить энергетические затраты на процесс сверления, уменьшить эффективную мощность электродвигателя сверлильного станка. Эксплуатационная стойкость нитроцементированного инструмента по сравнению со стандартным неупрочненным инструментом повышается в 1,7...1,9 раза, что позволяет сделать вывод об экономической целесообразности применения процесса нитроцементации сверл, изготовленных из быстрорежущей стали Р6М5. Проведенные производственные испытания спиральных сверл и метчиков для нарезания метрической резьбы с нитроцементированными покрытиями показали повышение его эксплуатационной стойкости в 2,2 раза.

ЛИТЕРАТУРА

1. Ворошнин, Л.Г. Теория и технология химико-термической обработки: учеб. пособие / Л.Г. Ворошнин. – Минск: Новое знание, 2010. – 304 с.
2. Металловедение. Термическая и химико-термическая обработка сплавов: сб. науч. тр. / под ред. Б.Н. Арзамасова. – М.: Изд-во МГТУ, 2003. – 246 с.
3. Многокомпонентные диффузионные покрытия / Л.С. Ляхович [и др.]. – Минск: Наука и техника, 1974. – 288 с.
4. Стуканов, В.А. Металловедение: учеб. пособие / В.А. Стуканов. – М.: Форум: ИНФРА-М, 2008. – 368 с.
5. Справочник технолога-машиностроителя: в 2-х т. / под ред. А.М. Дальского [и др.]. – М.: Машиностроение, 2003. – Т. 1. – 912 с.
6. Справочник технолога-машиностроителя: в 2-х т. / под ред. А.М. Дальского [и др.]. – М.: Машиностроение, 2003. – Т. 2. – 944 с.
7. Обработка металлов резанием. Справочник технолога / под общ. ред. А.А. Панова. – М.: Машиностроение, 2003. – 784 с.
8. Марочник сталей и сплавов / под ред. А.С. Зубченко. – М.: Машиностроение, 2003. – 784 с.

Поступила 12.06.2012

INCREASING RESISTANCE OF HIGH-SPEED DRILLS BY LOW-TEMPERATURE CARBON NITRIDE COATING

A. DOLGIKH

Some of the characteristics and operational stability of the protective diffusion layers obtained by low-temperature carbon nitride coating of high speed steels were investigated. A measurement of such important characteristics of the cutting process parameters such as torque and the axial component of cutting forces, wear, respectively, front and back surfaces was done. To determine the operational stability of nitride hardening coatings obtained in the pyrolysis products of urea, the tests were conducted in accordance with the methodology and standardized using methods of mathematical experiment planning. Material presented in this paper has practical application, the proposed composition and technology of applying protective coatings by chemical-heat treatment can be recommended as a process, significantly improving operational performance stability and reliability of twist drills.

УДК 66.094.29:621.643.053(476)

СПОСОБ ПОВЫШЕНИЯ НАДЕЖНОСТИ КОЛЬЦЕВЫХ СВАРНЫХ СОЕДИНЕНИЙ МАГИСТРАЛЬНЫХ ТРУБОПРОВОДОВ ПРИ ДЛИТЕЛЬНОЙ ЭКСПЛУАТАЦИИ

А.Н. ЯНУШОНОК

(Полоцкий государственный университет);

канд. техн. наук, доц. А.С. СНАРСКИЙ

(Белорусский национальный технический университет, Минск)

Представлены результаты исследования технического состояния магистральных трубопроводов, эксплуатируемых свыше 40 лет. Рассмотрены вопросы повышения надежности магистральных трубопроводов, длительное время используемых в работе, за счет восстановительной термической обработки кольцевых сварных соединений. Проведена оценка эффективности применения разрушающего метода контроля механических свойств металла непосредственно на магистральном трубопроводе (после проведения термической обработки на заданных режимах).

Введение. Республика Беларусь обладает уникальной системой магистральных трубопроводов для транспортировки природного газа, нефти и нефтепродуктов. Общая протяжённость технических коридоров, в которых проложены магистральные нефтепроводы и магистральные нефтепродуктопроводы по территории Беларуси, составляет 1231,5 км, а суммарная длина проложенных в этих коридорах трубопроводов в одноконтурном исчислении – 3613,5 км; протяженность разветвленной сети магистральных газопроводов – 7490 км, в том числе более 2500 км газопроводов большого диаметра, обеспечивающих непосредственно транзит природного газа в страны Европы. Особенностью эксплуатируемой системы транспорта углеводородов является срок ее эксплуатации, так как большинство трубопроводов было построено в 1960 – 1980-е годы. В связи с этим имеет место прогрессирующее старение эксплуатируемой системы транспорта углеводородов. Около 80 % магистральных трубопроводов, транспортирующих жидкие углеводороды, и более 25 % магистральных газопроводов выработали свой срок эксплуатации. Приблизительно 25 % магистральных газопроводов вплотную подошли к данному возрасту.

Большинство эксплуатирующихся в настоящее время на территории Республики Беларусь магистральных трубопроводов входят в период, когда возрастает интенсивность отказов и аварий, так как по мере увеличения возраста трубопроводов усиливается тенденция к снижению их надёжности и, следовательно, повышению вероятности возникновения аварий [1 – 3]. Указанное обстоятельство в значительной мере обусловлено процессами старения, происходящими в металле.

Анализ материального исполнения магистральных трубопроводов, проложенных по территории Беларуси, показывает, что большинство из них изготовлено из низколегированных кремнемарганцевых сталей (чаще всего это стали 17ГС, 17Г1С, 17Г1С-У, 10Г2С1, 14ГН, 14ХГС, 09Г2С, 19Г). Характерной особенностью проявления старения трубных сталей является снижение ударной вязкости металла, при этом качественные зависимости данного снижения практически одинаковы для основных отечественных трубных сталей (стали 17ГС, 14ХГС, 09Г2С, 16Г2У, 19Г): через 30 лет эксплуатации ударная вязкость снижается в 3...5 раз (например, для стали 17ГС – основной стали для большинства магистральных трубопроводов – наблюдается снижение с 260 до 80...90 Дж/см² [1], что проиллюстрировано рисунком 1).

Обобщая результаты исследований по вопросу изменения структуры и свойств металла магистральных трубопроводов, можно констатировать, что при длительных сроках эксплуатации (наиболее четко и устойчиво деградационные процессы проявляются в металле после эксплуатации 30 и более лет) происходит снижение пластических, некоторое повышение прочностных свойств, а главное – значительное снижение ударной вязкости и хладостойкости. При этом указанные изменения

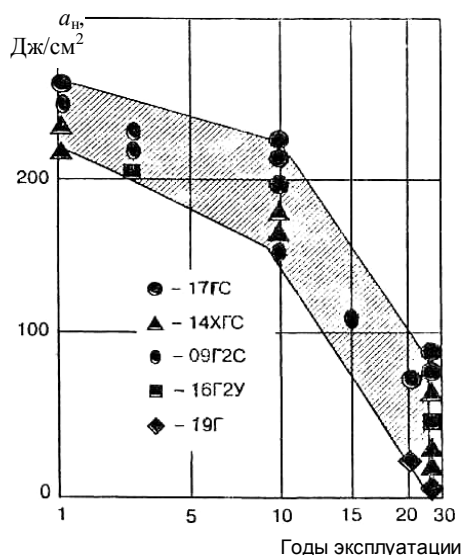


Рис. 1. Изменение ударной вязкости трубных сталей при эксплуатации газопроводов [1]

наиболее существенны для металла сварных соединений. Из-за значительного снижения уровня ударной вязкости увеличивается потенциальная возможность возникновения и роста трещин, а следовательно, возрастает вероятность аварийного разрушения.

В настоящее время основными мероприятиями по поддержанию прочностной надежности магистральных трубопроводов являются испытания повышенным давлением, выборочный ремонт по результатам диагностики внутритрубными инспекционными снарядами и замена существующих трубопроводов. Гидростатические испытания повышенным давлением позволяют не только выявить различные дефекты труб, но и частично восстановить прочностные свойства [4].

Каждый из перечисленных методов, несмотря на достаточно высокую эффективность, имеет также и существенные недостатки: не выявляются короткие, но глубокие коррозионные повреждения, которые могут привести к возникновению утечки; ряд дефектов, состояние которых во время испытаний было близко к разрыву, продолжают свой рост после стабилизации давления и могут проявиться при эксплуатации даже при невысоких давлениях; пластические деформации вследствие высоких напряжений в металле труб ведут к его охрупчиванию; необходимость остановки трубопровода для проведения испытаний; загрязнение окружающей среды.

Применение технологий выборочного ремонта по результатам диагностики внутритрубными инспекционными снарядами позволяет восстановить надежность участков с выявленными опасными повреждениями. Однако используемые в настоящее время внутритрубные инспекционные снаряды не позволяют обнаружить все опасные дефекты, и в первую очередь в сварных соединениях, отчеты по диагностическому обследованию содержат ошибки в части описания геометрических размеров, не все дефекты, зарегистрированные дефектоскопами, отражаются в заключительном отчете [5]. Кроме того, данный подход не позволяет выявить и восстановить участки с низким уровнем механических свойств.

Тотальная замена линейной части требует значительных капиталовложений и в связи с возможностью продолжения работы существующих магистральных трубопроводов не всегда целесообразна.

Учитывая эти обстоятельства, можно сформулировать актуальную задачу для системы магистральных трубопроводов – *разработка и внедрение новых эффективных мероприятий по повышению надежности длительно эксплуатируемых трубопроводов, а также неразрушающих методов оценки фактического состояния металла, его механических свойств и структуры с целью повышения надежности функционирования и продления ресурса безопасной эксплуатации всей трубопроводной системы.*

Восстановление механических и эксплуатационных свойств основного металла труб и металла сварных соединений возможно за счет проведения специальной термической обработки. В Полоцком государственном университете проведены экспериментальные исследования с целью оценки текущего технического состояния магистральных трубопроводов на примере магистральных нефтепродуктопроводов «Брянск – Дисна» и «Стальной Конь – Запад» ЧУП «Запад-Транснефтепродукт», эксплуатируемых 44 года, и определения оптимальных условий восстановления эксплуатационных свойств кольцевых сварных соединений магистральных трубопроводов, находившихся в эксплуатации длительное время.

Оценка технического состояния проводилась на основании анализа опасности повреждений и дефектов магистральных трубопроводов, обнаруженных по результатам диагностического обследования внутритрубными инспекционными снарядами и исследования химического состава, механических свойств и микроструктуры как основного металла труб, так и их сварных соединений [6]. Анализ данных внутритрубной диагностики показал, что около 99,8 % выявленных повреждений составляют повреждения коррозионного типа. Из них более 80 % имеют малые геометрические размеры – менее 20 % от толщины стенки трубопровода – и не представляют опасности. По оставшимся дефектам и повреждениям на основании прочностных расчетов определена степень опасности.

Для проведения исследований служебных свойств, химического состава и микроструктуры из эксплуатируемых в течение 44 лет магистральных нефтепродуктопроводов были отобраны 16 темплетов как дефектных, вырезанных при проведении плановых ремонтных работ, так и бездефектных, вырезанных специально для проведения исследования. Каждая контрольная вырезка магистрального трубопровода имела кольцевой сварной стык. Испытания на статическое растяжение плоских образцов без головок сварных соединений и основного металла труб проводились согласно ГОСТ 6996 [7]. Определялся угол изгиба сварных соединений при испытании на статический изгиб согласно требованиям ГОСТ 6996 [7]. Контроль указанных механических характеристик проводился с помощью разрывной машины для статических испытаний Р-20. Для проведения испытаний на ударный изгиб вдоль оси трубопровода были вырезаны плоские образцы размером 5×20×120 мм в соответствии с ГОСТ 6996 [7]. Исследования характеристик сопротивления хрупкому разрушению основного металла и сварных соединений проводились на образцах с U-образным и V-образным надрезом при помощи маятникового копра МК-30А согласно ГОСТ 9454 [8], ГОСТ 6996 [7]. Также проводилось измерение твердости с помощью стационарного твердомера ТК-2 и исследования микроструктуры на оптическом микроскопе «Neophot-21» при увеличениях 100^x, 400^x, 1000^x. Определение химического состава осуществлялось при помощи атомно-эмиссионного фотоэлектрического многоканального спектрометра ЭМАС-200ССД, который на основании анализа эмиссионных спектров позволяет определять химический состав металла с относительной погрешностью измерения концентрации не более 5 %.

В результате проведенных экспериментальных исследований выявлено, что показатели предела прочности, предела текучести, ударной вязкости, угла загиба, твердости и относительного удлинения в основном соответствуют значениям, установленным требованиями технических нормативных правовых актов (за исключением отдельных локальных участков). Кольцевые сварные соединения магистральных трубопроводов имеют более низкие механические характеристики по сравнению с основным металлом. Показатели предела прочности сварных соединений на 25 % ниже, чем у основного металла. Значения ударной вязкости имеют значительный разброс, тем не менее систематически и значительно ниже (в 1,5...2 раза) показателей основного металла [6]. В то же время низкие значения ударной вязкости металла сварных соединений в сочетании с существующими дефектами являются основной причиной возникновения аварийных ситуаций на линейной части магистральных трубопроводов Республики Беларусь [3].

Таким образом, проведенные нами исследования подтвердили необходимость разработки способа повышения надежности кольцевых сварных соединений труб за счет восстановления ударной вязкости.

На основании обзора литературных источников выявлено, что наиболее перспективным способом восстановительной термической обработки является *высокий отпуск*. Для определения оптимальных параметров (время и температура) восстановления ударной вязкости основного металла и сварных соединений магистральных трубопроводов, подвергшихся длительной эксплуатации, изготавливались образцы (размером 55×10×2 мм), которые подвергались термической обработке отдельными партиями при температуре 580, 630, 680 и 730 °С в течение 15, 30 и 60 мин, после чего образцы остывали на спокойном воздухе. Исследования характеристик сопротивления хрупкому разрушению сварных соединений проводились на образцах с U-образным надрезом при помощи маятникового копра МК-30А согласно ГОСТ 9454 [8] и ГОСТ 6996 [7]. На рисунке 2 представлена зависимость изменения значений ударной вязкости сварного соединения при высоком отпуске в зависимости от температуры и времени термической обработки.

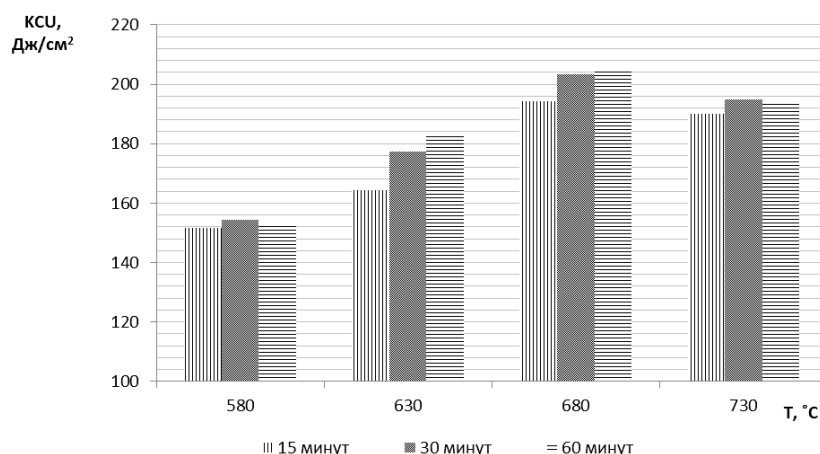


Рис. 2. Изменение значений ударной вязкости сварного соединения при высоком отпуске

Как видно из представленной диаграммы, время выдержки не значительно влияет на повышение ударной вязкости. В целом с увеличением продолжительности термической обработки наблюдается увеличение ударной вязкости сварного соединения. Наиболее существенный прирост происходит при увеличении времени выдержки с 15 до 30 мин. Дальнейшее увеличение до 60 мин при росте энергозатрат на проведение восстановительной термической обработки приводит к меньшему росту ударной вязкости, а в некоторых случаях и к незначительному снижению по сравнению с 30-минутной обработкой, которое можно объяснить неоднородностью свойств сварного соединения и, соответственно, значительным интервалом разброса вязких свойств вдоль шва. Постепенное увеличение температуры ведет к более интенсивному повышению значений ударной вязкости по сравнению с увеличением времени выдержки и достигает своего максимума при температуре 680 °С. Дальнейшее повышение температуры до 730 °С приводит к ее снижению. Таким образом, оптимальным режимом термической обработки сварных соединений магистральных трубопроводов после длительной эксплуатации является высокий отпуск с выдержкой в течение 30 мин при температуре 680 °С, при котором происходит наиболее значительное увеличение ударной вязкости.

При проведении высокого отпуска помимо повышения значений ударной вязкости ожидалось снижение значений предела прочности и твердости металла. В связи с этим проведены испытания на статическое растяжение плоских образцов сварных соединений до и после проведения восстановительной обработки в соответствии с ГОСТ 6996 [7]. Вместе с испытаниями на прочность также проводился контроль твердости и металлографические исследования. В таблице 1 представлены некоторые типичные

результаты изменения механических свойств сварных соединений после высокого отпуска по предложенному оптимальному режиму.

Таблица 1

Изменение твердости и предела прочности сварных соединений труб магистральных трубопроводов

№	Режим термообработки		σ_b , МПа		Твердость (сварной шов/ЗТВ), НВ	
	температура, °С	время выдержки, мин	до термообработки	после термообработки	до термообработки	после термообработки
1	680	15	495	450	157 / 146	153 / 144
2	680	30	467	447	168 / 177	156 / 166
3	680	60	530	521,5	175 / 173	160 / 156

Как видно из представленной таблицы, после высокого отпуска образцов сварных соединений труб магистральных трубопроводов, находящихся в эксплуатации длительное время, происходит незначительное снижение значений твердости и предела прочности. Изменение значений предела прочности при этом невелико и может не учитываться в прочностных расчетах. Таким образом, полученные результаты соответствуют ожидаемым. Эффективность термической обработки основного металла труб по предложенному оптимальному режиму немного меньше по сравнению с термической обработкой сварных соединений (прирост ударной вязкости составил 50...55 % для сварных соединений и 35...45 % для основного металла). Одна из вероятных причин – меньшие внутренние напряжения в основном металле труб по сравнению с металлом сварных соединений.

Исследования микроструктуры методом световой микроскопии с увеличениями 100^x, 400^x и 1000^x выявили отсутствие изменений размера зерна основного металла после проведения высокого отпуска. Структуры корневого и заполняющих слоев кольцевого сварного соединения в процессе сварки подвергаются рекристаллизации и имеют структуру, близкую к равноосной, которая практически не изменяется при высоком отпуске. На участке зоны термического влияния, подвергшемся в процессе сварки нормализации, значительных изменений после термической обработки в геометрии структурных составляющих не наблюдается. Особенности кристаллизации облицовочного слоя сварного шва приводят к образованию дендритной структуры наплавленного металла, обладающей относительно низкими механическими свойствами. В результате термической обработки в этой области протекают процессы дробления дендритов и образования более энергетически выгодной и обладающей более высоким комплексом механических свойств ферритно-перлитной структуры. Зоны термического влияния основного металла представляют собой узкий участок перегрева (видманштеттова структура), переходящий в участок нормализации. Феррит и цементит на участке перегрева образует длинные пластины (иглы). Данные структуры обладают низкими пластическими и вязкими свойствами, т.е. склонны к хрупкому разрушению. Под воздействием высокой температуры наблюдается исправление этой структуры (закругление игл), что приводит к возрастанию ударной вязкости. На рисунке 3 представлены типичные изменения микроструктуры в результате высокого отпуска (с температуры 680 °С после выдержки в течение 30 мин) в зоне термической обработки на примере видманштетговой структуры, образовавшейся в зоне термического влияния сварного соединения.

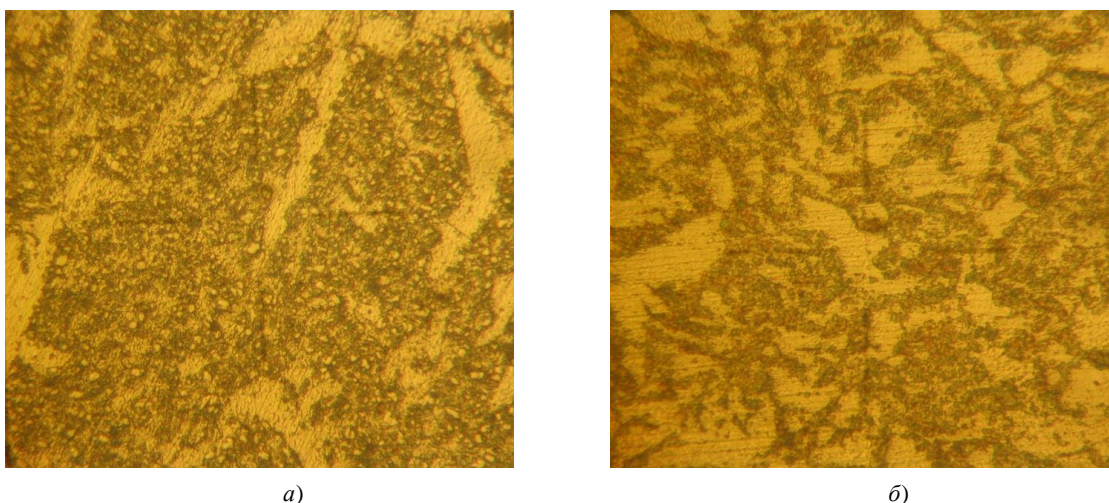


Рис. 3. Видманштеттова структура зоны термического влияния кольцевого сварного соединения, 400^x:
а – до термической обработки; б – после термической обработки

Снятие напряжений в основном металле и сварных соединениях, а также структурные изменения подтверждаются изменением микротвердости. В таблице 2 представлены типичные значения микротвердости сварного соединения магистрального трубопровода, претерпевшего длительную эксплуатацию, до и после термической обработки (восстановительного высокого отпуска).

Таблица 2

Микротвердость сварного соединения магистрального трубопровода до и после восстановительного высокого отпуска (680 °С с выдержкой в течение 30 мин)

Зона сварного соединения	Нц, МПа	
	исходное состояние	после высокого отпуска
Основной металл	1600...1800	1400...1500
Облицовочный слой	2300...2400	1800...2000
Корневой и заполняющие слои	1700...1900	1500...1600
Зона термического влияния (видманштеттова структура)	1900...2000	1600...1800
Участок нормализации по зоне термического влияния	1000...1200	1000...1100

Как видно из таблицы, термическая обработка сварного соединения при 680 °С приводит к снижению значений твердости в среднем на 300 МПа. Наиболее сильно снижается твердость в зоне столбчатых кристаллов облицовочного слоя. Таким образом, изменения механических характеристик подтверждаются соответствующими изменениями в микроструктуре металла сварного соединения.

В связи с преобладанием на длительно эксплуатируемых трубопроводах повреждений коррозионного типа проведены исследования влияния восстановительного высокого отпуска (по предложенному оптимальному режиму) на изменение коррозионной стойкости металла кольцевых сварных соединений. Определение склонности к коррозии проводилось на образцах трубного материала, вырезанных из магистрального нефтепродуктопровода, эксплуатируемого в течение 44 лет. Для этого производилась разделка поперечных сварных соединений при помощи шлифовальной машинки с отрезным кругом. На каждом стыковом сварном соединении вырезались непосредственно сам сварной шов, околошовная зона (зона термического влияния) и участок основного металла трубы. Последующая механическая обработка на фрезерном станке и шлифовка наждачной бумагой с мелким зерном позволила удалить зону нагрева, образовавшуюся при резке стыкового соединения трубопровода, и получить образцы (рис. 4) единого размера с длиной по окружности трубопровода 175 мм и шириной 10 мм.



Рис. 4. Образец для испытаний на коррозионную стойкость (натуральная величина)

Толщина образца определялась толщиной стенки трубопровода, несколько уменьшенной за счет удаления слоя, подвергшегося коррозии за время эксплуатации. При этом половина вырезанных образцов подвергалась высокому отпуску при температуре 680 °С с выдержкой в течение 30 мин.

Полноценное моделирование условий протекания коррозионных процессов в магистральных трубопроводах затруднено ввиду необходимости создания высоких давлений и скоростей движения коррозионной среды для определения скорости внутренней коррозии и значительного различия свойств почвенного электролита при моделировании внешней коррозии. В связи с этим был выбран упрощенный метод испытания: полное погружение образцов в коррозионную среду (неэлектролит) в открытом сосуде при комнатной температуре без перемешивания коррозионной среды. Испытания проводились в соответствии с ГОСТ 9.905 [9] и ГОСТ 9.908 [10]. В качестве показателя коррозии использовался наиболее простой и надежный метод изменения массы, непосредственно указывающий количество металла, разрушенного коррозией. Определение потерь массы осуществлялось взвешиванием образцов на аналитических весах с точностью до 0,0001 грамма.

В результате проведенных исследований выявлено, что термическая обработка на оптимальных режимах приводит к снижению скорости коррозии металла сварного соединения до 3,3 % [11]. При этом наиболее существенное снижение наблюдалось для зоны термического влияния (3...3,3 %), менее значительное – для сварного шва (2...3 %) и наименее заметное – для основного металла трубопровода (0,4...0,9 %). Данная тенденция хорошо коррелирует с изменениями в микроструктуре сварного соединения, где также наиболее заметные изменения в результате термической обработки наблюдаются в зоне термического влияния (видманштеттова структура) и зоне столбчатых кристаллов в облицовочном слое.

Вышеизложенное позволяет рекомендовать проведение высокого отпуска с целью повышения эксплуатационных свойств (ударной вязкости и коррозионной стойкости) материала сварных соединений длительно эксплуатируемых магистральных трубопроводов.

При применении восстановительной термической обработки возникает также проблема разработки именно неразрушающего метода оценки эффективности восстановительной термической обработки с целью выявления возможности внедрения разрабатываемого метода в практике ремонта линейной части магистральных трубопроводов. Судить об эффективности выполненной восстановительной термической обработки кольцевых сварных стыков магистральных трубопроводов только по результатам замера твердости переносными твердомерами (по показателю ее снижения) не совсем правильно, так как величина твердости связана с прочностью (а точнее, лишь с временным сопротивлением) и не дает информации об изменении ударной вязкости. Вырезка образцов из стыков трубопроводов после термической обработки и оценка механических свойств на образцах, изготовленных из вырезки, вызывает необходимость последующего ремонта (заварки) места вырезки, оказывает влияние на механические и эксплуатационные свойства области ремонта и прилегающих зон, что также нецелесообразно.

Практическое применение могут иметь методы, основанные на использовании взаимосвязи ударной вязкости со значениями свойств материала, определение которых возможно неразрушающими методами, например, при измерении твердости. Существование корреляционной взаимосвязи между ударной вязкостью и другими механическими характеристиками обосновывается в работах [12; 13].

В результате исследования более пяти тысяч образцов разработан способ определения ударной вязкости стальных изделий в зависимости от относительного сужения по математической зависимости. Согласно данному методу ударную вязкость определяют по формуле, связывающей ударную вязкость и относительное сужение материала [13]. В то же время данный метод не является неразрушающим, так как величина относительного сужения определяется в результате испытаний стандартных образцов на растяжение с помощью разрывной машины. При этом требуемые размеры образцов таковы, что отбор материала из магистрального трубопровода будет невозможен без вырезки образцов и последующего ремонта.

Более совершенным является способ определения ударной вязкости неразрушающим методом [14].

Сущность способа состоит в том, что ударную вязкость определяют в зависимости от относительного сужения материала по формуле:

$$KCU = \gamma \cdot \frac{\psi}{1 - \psi}, \text{ МДж/м}^2, \quad (1)$$

где KCU – ударная вязкость, МДж/м²; ψ – относительное сужение, отн. ед.; γ – уточняющий коэффициент, имеющий значения: $\gamma = 0,61$ при $\psi > 0,8$; $\gamma = 0,76$ при $0,6 < \psi \leq 0,8$; $\gamma = 0,83$ при $0,4 < \psi \leq 0,6$; $\gamma = 1,19$ при $0,2 < \psi \leq 0,4$; $\gamma = 1,66$ при $\psi \leq 0,2$.

При этом относительное сужение материала определяют по геометрическим параметрам отпечатка [15], полученного после вдавливания в материал пирамидального индентора с углом между противоположными гранями 136° при фиксированной нагрузке, по формуле [15]:

$$\psi = \frac{16,4 + 80 \cdot k \cdot S}{100}, \quad (2)$$

где ψ – относительное сужение, отн. ед.; S – ширина отпечатка, мм; k – коэффициент кратности, имеющий значения: $k = 1$ при нагрузке 1000 Н; $k = 1,414$ при нагрузке 500 Н; $k = 1,825$ при нагрузке 300 Н; $k = 2,235$ при нагрузке 200 Н; $k = 3,161$ при нагрузке 100 Н; $k = 4,472$ при нагрузке 50 Н.

Отличием данного способа является определение относительного сужения материала не посредством испытаний образцов, вырезанных из конструкции, а по математической зависимости, связывающей параметры отпечатка пирамидального индентора с относительным сужением материала, что позволило отказаться от вырезки образцов из диагностируемой конструкции и обеспечило возможность определения ударной вязкости неразрушающим способом.

Для осуществления проверки возможности применения указанного выше способа из кольцевых сварных соединений магистральных трубопроводов готовились макрошлифы, на которых определяли параметры отпечатка после вдавливания пирамидального индентора. В данных исследованиях использовали твердомер WPM. Нагрузка на индентор твердомера составляла 200 Н. Правомерность определения ударной вязкости по параметрам отпечатка индентора при других нагрузках (50 Н, 100 Н, 300 Н, 500 Н, 1000 Н) обусловлена геометрическим подобием отпечатков, полученных на материале алмазной пирамидой с углом между противоположными гранями 136°. Для данного вида инденторов существует полное геометрическое подобие отпечатков и значений твердости независимо от применяемой нагрузки [16]. В связи с этим результаты, полученные при нагрузке 200 Н, можно распространить на весь приведенный ряд нагрузок (с учетом того, что широко применяемые переносные твердомеры, определяющие твердость по Виккерсу непосредственно на конструкции, работают при нагрузке 50 Н).

Измерение размеров отпечатков производилось с помощью окуляра-микрометра микротвердомера ПМТ-3. После этого изготавливали образцы для испытаний на ударную вязкость и проводили испытания по стандартной методике согласно ГОСТ 9454 [8]. Затем сравнивались значения, полученные разрушающим и неразрушающим методами. Типичные расчетные и экспериментальные значения ударной вязкости представлены в таблице 3.

Таблица 3

Значения ударной вязкости, определенные разрушающим и неразрушающим методами

№ образца	1	2	3	4	5	1'	2'	3'	4'	5'
КСУ, МДж/м ² (неразрушающий предлагаемый метод)	0,65	0,88	0,66	0,85	1,24	0,93	1,26	0,86	1,27	1,7
КСУ, МДж/м ² (разрушающий метод ГОСТ 9454 [8])	0,66	0,95	0,69	0,91	1,37	0,98	1,45	0,88	1,43	1,95
Погрешность, %	1,5	7,4	4,3	6,6	9,5	5,1	13,1	2,3	11,2	12,8
Образцы 1...5 – без восстановительной термической обработки; образцы 1'...5' – после проведения восстановительной термической обработки.										

Из таблицы 3 видно, что минимальная и максимальная погрешности определения ударной вязкости составляют 1,5 и 13,1 % соответственно. Учитывая высокий уровень рассеивания ее значений для сварных соединений, это является приемлемым результатом. При этом значения на всех образцах ниже соответствующих им значений, определенных разрушающим методом по ГОСТ 9454 [8]. Это позволяет говорить о некотором коэффициенте запаса ударной вязкости, и данное обстоятельство положительно влияет на надежность эксплуатации магистрального трубопровода при определении ударной вязкости металла магистральных трубопроводов по предложенному способу.

Очевидно, что внедрение любых научно-исследовательских разработок в производство возможно только в случае его экономической целесообразности.

Экономическая оценка эффективности внедрения разработанного метода восстановительной термической обработки проводилась на основании сравнения затрат на производство ремонтных работ сварного соединения методом вырезки катушки и затрат на восстановление свойств сварного соединения с помощью восстановительной термической обработки. В стоимость работ по обоим вариантам входят затраты на материалы, их транспортировку и хранение, заработная плата рабочих, затраты на эксплуатацию строительных машин и механизмов, накладные расходы и плановые накопления. Для определения затрат составлялся перечень необходимых работ и материальных ресурсов, на основании которого, используя сборники цен на материалы и сборники ресурсно-сметных норм на производство строительно-монтажных работ, определялась сметная стоимость работ. Объем затрат определялся в базисных ценах 2006 года и пересчитывался в текущие цены. В зависимости от диаметра трубопровода и способа проведения работ по восстановительной термической обработке (собственными силами или силами подрядной организации) ожидаемый экономический эффект от внедрения способа в ценах июля 2011 года может составить от 282 370 до 3 227 525 белорусских рублей на один восстановленный стык [17].

Таким образом, предлагаемый способ восстановления эксплуатационной надежности кольцевых сварных соединений магистральных трубопроводов, отработавших длительное время, путем проведения восстановительной термической обработки показывает потенциальную технико-экономическую эффективность своего применения и может быть внедрен в практику производства ремонтных работ.

Заключение. В результате проведенного исследования *выявлены* особенности технического состояния магистральных трубопроводов, эксплуатируемых в течение 30...40 лет в условиях Республики Беларусь (на примере МНПП «Брянск – Дисна» и «Стальной Конь – Запад»). Экспериментально *установлено*, что химический состав и механические свойства металла труб и кольцевых сварных соединений магистральных трубопроводов после длительной эксплуатации в основном (за исключением отдельных локальных участков) соответствуют значениям, установленным требованиями технических нормативных правовых актов. Кольцевые сварные соединения магистральных трубопроводов имеют более низкие механические характеристики по сравнению с основным металлом: показатели предела прочности и предела текучести до 25 % ниже, чем у основного металла; значения ударной вязкости имеют значительный разброс, тем не менее систематически и значительно ниже (в 1,5...2 раза) показателей основного металла. При этом, несмотря на преобладание коррозионных повреждений (более 99 % от всех обнаруживаемых дефектов и повреждений), для длительно эксплуатируемых магистральных трубопроводов основной причиной возникновения аварий является разрушение сварного соединения.

Решена задача повышения надежности эксплуатации выработавших нормативный срок службы магистральных трубопроводов за счет восстановления механических свойств кольцевых сварных соединений восстановительной термической обработкой благодаря применению оригинального способа неразрушающего контроля (определение ударной вязкости по параметрам отпечатка пирамидального индентора). Это позволяет снизить вероятность возникновения хрупкого разрушения, отказаться от преждевременной замены выработавших свой ресурс по критерию ударной вязкости кольцевых сварных соединений и тем самым сэкономить за счет продления срока эксплуатации денежные средства в размере до 3,2 млн. рублей на один восстановленный стык.

Экспериментально *установлен оптимальный режим* восстановительной термической обработки кольцевых сварных соединений магистральных трубопроводов, эксплуатируемых длительное время, по критерию прироста ударной вязкости, характеризующей уровень надежности сварного соединения магистрального трубопровода. Высокий отпуск при 680 °С с выдержкой в течение 30 мин, приводит к росту значений ударной вязкости до 50 % и незначительному снижению предела текучести и предела прочности, которое может не учитываться при проведении прочностных расчетов. Предложенная восстановительная термическая обработка на оптимальных режимах повышает также коррозионную стойкость основного металла, сварного шва и зоны термического влияния сварных соединений магистральных трубопроводов. При этом наиболее существенное снижение скорости коррозии наблюдается для зоны термического влияния (3...3,3 %), менее значительное – для сварного шва (2...3 %) и минимальное – для основного металла трубопровода (0,4...0,9 %).

Установлена зависимость между параметрами пирамидального отпечатка, полученного при определении твердости по Виккерсу стационарными или переносными твердомерами, и значениями ударной вязкости сварных соединений низкоуглеродистых и низколегированных трубных сталей (Сталь 20, 17ГС, 10Г2С1, 14ГН, 19Г, 14ХГС). Полученная зависимость может быть использована в основе неразрушающего способа определения механических характеристик при диагностировании технического состояния магистральных трубопроводов и контроле эффективности проводимой восстановительной термической обработки с погрешностью результата не более 13,1 %.

ЛИТЕРАТУРА

1. Иванцов, О.М. Надежность и безопасность магистральных трубопроводов России / О.М. Иванцов // Трубопроводный транспорт. – 1997. – № 10. – С. 26 – 31.
2. Технические и ландшафтные характеристики магистральных нефте- и нефтепродуктопроводов Беларуси / В.К. Липский [и др.] // Вестн. Полоц. гос. ун-та. Серия В. Прикладные науки. – 2004. – № 12. – С. 140 – 142.
3. Липский В.К., Методика восстановительной термической обработки магистральных трубопроводов, основанная на неразрушающей оценке фактического уровня механических свойств металла / В.К. Липский, А.Н. Янушонок, А.С. Снарский // Вестн. Полоц. гос. ун-та. Серия В. Прикладные науки. – 2006. – № 12. – С. 93 – 96.
4. Бордовский, А.М. Метод частичного восстановления прочностной надежности труб нефтепровода / А.М. Бордовский // Надежность и безопасность магистрального трубопроводного транспорта: тез. докл. IV междунар. науч.-практ. конф., Новополоцк, 20 – 24 окт. 2003 г.; УО «ПГУ»; редкол.: В.К. Липский [и др.]. – Новополоцк, 2003. – С. 18 – 19.
5. Прохоренко, А.А. Оценка достоверности отчетов и некоторые особенности выявления отдельных видов дефектов внутритрубными дефектоскопами / А.А. Прохоренко // Надежность и безопасность магистрального трубопроводного транспорта: тез. докл. VII междунар. науч.-техн. конф., Новополоцк, 22 – 25 ноябр. 2011 г.; УО «ПГУ»; редкол.: В.К. Липский [и др.]. – Новополоцк, 2011. – С. 151 – 152.

6. Оценка фактического состояния металла магистральных трубопроводов / А.Н. Янушонок [и др.] // Вестн. Полоц. гос. ун-та. Серия В. Прикладные науки. – 2008. – № 8. – С. 128 – 132.
7. Сварные соединения. Методы определения механических свойств: ГОСТ 6996. – Введ. 01.01.67. – М.: Изд-во стандартов, 1966. – 45 с.
8. Металлы. Метод испытания на ударный изгиб при пониженных, комнатной и повышенных температурах: ГОСТ 9454. – Введ. 01.01.79. – М.: Изд-во стандартов, 1979. – 15 с.
9. Единая система защиты от коррозии и старения. Методы коррозионных испытаний. Общие требования: ГОСТ 9.905-1982. – Введ. 01.07.83. – М.: Изд-во стандартов, 1982 – 5 с.
10. Единая система защиты от коррозии и старения. Металлы и сплавы. Методы определения показателей коррозии и коррозионной стойкости: ГОСТ 9.908. – Введ. 01.01.87. – М.: Изд-во стандартов, 1987. – 17 с.
11. Янушонок, А.Н. Изменение коррозионной стойкости участков сварных соединений магистральных трубопроводов, претерпевших длительную эксплуатацию, под влиянием высокотемпературного отпуска // А.Н. Янушонок, А.С. Снарский // Вестн. Полоц. гос. ун-та. Сер. Ф. Строительство. Прикладные науки. – 2010. – № 6. – С. 95 – 102.
12. Хлопотов, О.Д. О возможности существования взаимосвязей механических характеристик / О.Д. Хлопотов // Заводская лаборатория. – 1973. – № 6, Т. 39. – С. 740 – 741.
13. Хлопотов, О.Д. Связь между ударной вязкостью и другими механическими характеристиками / О.Д. Хлопотов // Проблемы прочности. – 1971. – № 9. – С. 34 – 38.
14. Способ определения ударной вязкости стальных изделий: заявка № а20050386 на получение патента Респ. Беларусь / А.С. Снарский, Ф.И. Пантелеенко, А.В. Крыленко; заявитель УО «Полоцкий гос. ун-т»; заявл. 14.04.2005 // Афіцыйны бюл. / Нац. Цэнтр інтэлектуал. уласнасці. – 2006. – № 6 (53). – С. 24.
15. Киселев, Ю.А. Исследование связи между характеристиками пластичности и формой отпечатка по Виккерсу / Ю.А. Киселев // Заводская лаборатория. – 1969. – Т. 35, № 8. – С. 974 – 976.
16. Григорович, В.К. Твердость и микротвердость металлов / В.К. Григорович. – М.: Наука, 1976. – 230 с.
17. Янушонок, А.Н. Оценка экономической эффективности восстановительной термической обработки сварных кольцевых соединений магистральных трубопроводов, проработавших длительное время // А.Н. Янушонок, В.Н. Стахейко // Вестн. Полоц. гос. ун-та. Сер. Д. Экономические и юридические науки. – 2012. – № 6. – С. 47 – 52.

Поступила 15.05.2012

METHOD OF INCREASING THE RELIABILITY OF CIRCULAR WELDED JOINTS OF PIPELINES, IN LONG-TERM USE, ON THE BASIS OF NON-DESTRUCTIVE TESTING

A. YANUSHONOK, D. SNARSKIY

The paper presents some results of the study of the technical state of pipelines operated over 40 years. The problems of improving the reliability of pipelines, which have worked for a long time, by reducing the thermal processing of circular welded joints are observed. Evaluation of the effectiveness of non-destructive testing method of the mechanical properties of the metal directly to the main pipeline (after thermal processing on the specified modes) is made.

ХИМИЧЕСКАЯ ТЕХНОЛОГИЯ

УДК 665.765:621.892.26/.274

ПРИМЕНЕНИЕ РЕГЕНЕРИРОВАННОГО ОТРАБОТАННОГО МОТОРНОГО МАСЛА И ОРГАНИЧЕСКОГО ОТГОНА ШЛАМА В ПРОИЗВОДСТВЕ МЫЛЬНЫХ И УГЛЕВОДОРОДНЫХ ПЛАСТИЧНЫХ СМАЗОК

канд. хим. наук, доц. **С.В. ПОКРОВСКАЯ, Ю.А. БУЛАВКА,**
А.И. БОГДАНОВИЧ, А.В. ЗУБОВА
(Полоцкий государственный университет)

Исследуются свойства синтезированных пластичных смазок, сырьевыми компонентами которых являлись регенерированное отработанное масло, органический отгон шлама блока очистки производства сульфонатных присадок, стеарат кальция, парафин и петролатум. Показана возможность использования отработанных моторных масел в смеси с отгоном шлама в качестве дисперсионной среды как углеводородных, так и мыльных смазок. Приведен сравнительный анализ физико-химических и некоторых эксплуатационных свойств синтезированных смазок с аналогичными свойствами промышленно производимых Соллидол Ж, Ваерол-Э, вакуумной смазкой. Полученные результаты свидетельствуют о перспективности дальнейших исследований в этом направлении. Производство смазок с использованием сырья некавалифицированного применения позволит расширить их ассортимент, снизить нагрузку на окружающую среду и получить экономический эффект.

Введение. В процессе эксплуатации моторных масел в них накапливаются продукты окисления в виде асфальто-смолистых соединений, нагаров, лаков и других примесей, которые снижают качество масел. Резкое ухудшение эксплуатационных характеристик моторных масел наступает тогда, когда моюще-диспергирующие присадки, удерживающие продукты окисления моторного масла в коллоидном состоянии, в свободном состоянии практически исчерпаны. При данных условиях продукты окисления начинают выпадать в осадок, тем самым вызывая износ двигателя. Такое состояние моторного масла свидетельствует о необходимости его замены.

Отработанные моторные масла токсичны и канцерогенны, имеют невысокую степень биоразлагаемости (10...30 %), являются существенным источником загрязнения окружающей среды, так как сливание их в почву и водоемы в настоящее время превышает по объему аварийные сбросы и потери нефти при ее добыче, транспортировании и переработке, а при их утилизации методом сжигания происходит загрязнение атмосферы диоксидом серы, хлорорганическими соединениями, тяжелыми металлами и др. [1]. В связи с этим большое значение имеет полное или частичное восстановление качества отработанных масел с целью их повторного использования.

Для восстановления отработанных масел применяются технологические операции, основанные на физических, физико-химических, химических процессах, и заключаются в обработке масла с целью удаления из него продуктов старения и загрязнения. Последовательность методов технологических процессов представлена на рисунке 1 [2].

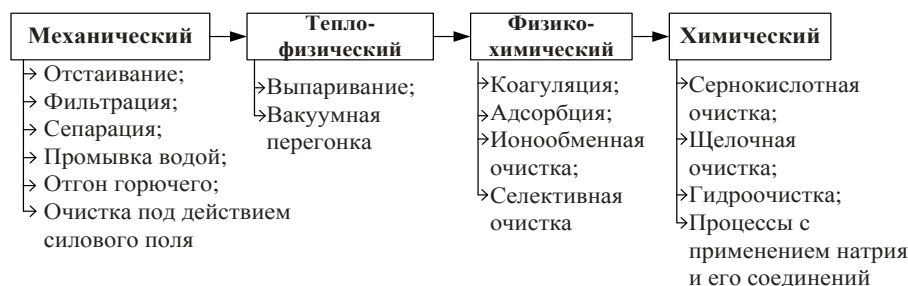


Рис. 1. Методы восстановления отработанного масла

Анализ современного состояния проблемы очистки отработанных масел свидетельствует о его фактической нерешенности как в теории, так и на практике, однако подавляющее большинство исследователей придерживаются мнения о том, что комбинирование очистки (с помощью отстойников, фильтров, центрифуг, адсорберов и др.), регенерации (коагуляций, сернокислотной очисткой и др.) и вторичной переработки (вакуумной перегонкой, экстракцией, гидроочисткой и др.) отработанных моторных

масел является наиболее рациональным методом их восстановления. На сегодняшний день доля регенерируемых масел от объема их производства в Англии составляет 10 %, в Японии – 5, в США – 4, в странах СНГ всего около 3 %. Следует отметить, что существующие методы регенерации отработанных масел характеризуются значительными энергетическими и материальными затратами.

Повторное использование отработанных моторных масел после очистки по прямому назначению в чистом виде или в смеси со свежим маслом требует квалифицированного подбора соответствующих пакетов присадок, однако и в этом случае регенерированные масла подвержены более интенсивному старению по сравнению с маслами, полученными традиционным способом.

В последние годы активно ведутся разработки в области использования отработанных и регенерированных моторных масел в качестве дисперсионной среды пластичных смазок, эмульсий и прочих масляных жидкостей [3 – 6].

Цель данной работы – регенерация отработанного моторного масла (ОММ), выявление возможности использования регенерированного моторного масла (РММ) в качестве дисперсионной среды пластичных смазок, а также поиск путей использования органического отгона шлама блока очистки производства высокощелочных сульфонатных присадок.

Объекты исследований. В качестве дисперсионной среды выбрано отработанное всесезонное полусинтетическое моторное масло ENEOS Semi-Synthetic (SAE: 10W-40, API: SL, ILSAC: GF-3), произведенное на нефтеперерабатывающем предприятии «Nippon Oil Co» (Япония), пробег которого составил 15 тыс. км. Входной анализ данного сырьевого компонента показал изменение внешнего вида (жидкость черного цвета с механическими примесями), снижение плотности и кинематической вязкости (при 40 и 80 °С) и увеличение кислотного числа относительно свежего масла. Вовлечение данного компонента в пластичную смазку в необработанном виде нецелесообразно вследствие его высокой коррозионной активности и летучести, вероятности абразивного износа пар трения, обусловленной присутствием неорганических примесей. В связи с этим для частичного восстановления эксплуатационных свойств выполнена его очистка по схеме, представленной на рисунке 2.

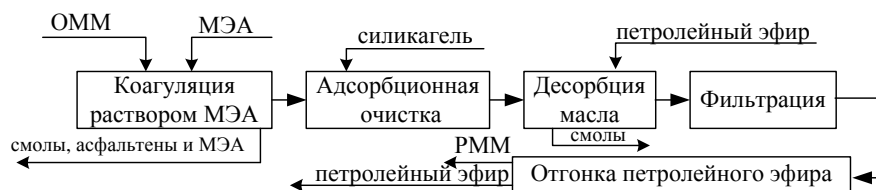


Рис. 2. Схема очистки отработанного моторного масла

Первоначально отработанное моторное масло подвергнуто коагуляции раствором моноэтаноламина (МЭА) для разрушения коллоидной системы и нейтрализации нафтеновых и нафтеноароматических кислот. В работе [7] показано, что при использовании в качестве коагулянта МЭА наблюдается наилучший эффект. Отработанное масло после коагуляции МЭА представляет собой эмульсию, состоящую из основы масла (дисперсионная среда), смол и асфальтенов (дисперсная фаза). Далее проведена адсорбционная очистка на крупнопористом сорбенте типа силикагеля ШСКГ, десорбция масла петролейным эфиром, извлечение оставшихся примесей загрязнений фильтрацией и выпаривание петролейного эфира.

Одной из задач работы являлось выявление возможности использования отгона шлама блока очистки сульфонатных присадок цеха № 3 СООО «ЛЛК-Нафтан» в производстве пластичных смазок. Данный вид отхода ранее использовался для получения присадки ГСК [8], производство которой в настоящий момент остановлено, часть отгона шлама сейчас добавляется при получении низкокислотного гудрона. В сложившихся условиях актуальным является поиск дополнительных возможностей его рационального применения на самом предприятии.

С целью отделения органической части от концентрата кальциевых соединений отгон шлама подвергли очистке по схеме, приведенной на рисунке 3.

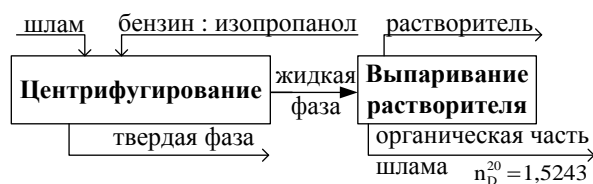


Рис. 3. Схема отделения органической части отгона шлама

В качестве загустителя мыльных смазок использован стеарат кальция (ТУ 2432-061-5685807-04) продукт ОАО «БелХим», углеводородных – парафин нефтяной твердый марки Т-1 (ГОСТ 23683-89) производства ОАО «Завод горного воска» и петролатум ПС-55 (ТУ 38.401166-90; изм. 2 от 20.06.2011) производства ОАО «Нафтан».

Методика синтеза смазок. Углеводородные смазки, загустителем которых является парафин и петролатум, получали следующим образом [9; 10]: взвешивали необходимые компоненты смазки (парафин, петролатум, регенерированное масло, органический отгон шлама) из расчета на общую массу готовой смазки – 100 г; в варочный аппарат загружали загуститель, регенерированное масло (в некоторых случаях добавляли отгон шлама); содержимое аппарата при непрерывном перемешивании подогревали до 80...85 °С и выдерживали 1 ч; не прекращая перемешивания, смазку охлаждали в варочном аппарате, затем выгружали.

Мыльные пластичные смазки получали следующим образом [9; 10]: взвешивали необходимые компоненты смазки (стеарат кальция, регенерированное масло, органический отгон шлама) из расчета на общую массу готовой смазки – 100 г; в варочный аппарат загружали регенерированное масло (в некоторых случаях добавляли отгон шлама), воздушно-сухое кальциевое мыло и воду (0,5 мл); содержимое аппарата при непрерывном перемешивании подогревали до 110...115 °С и выдерживали 30 мин; затем мыльно-масляный расплав охладили до 105 °С и добавили ещё 0,5 мл воды; не прекращая перемешивания, смазку охлаждали в варочном аппарате.

Результаты и их обсуждение. В лабораториях кафедры химической технологии топлив и углеводородных материалов УО «ПГУ» синтезирован ряд образцов пластичных смазок на основе регенерированного масла с добавлением отгона шлама и без него, компонентный состав и принятое условное обозначение шести отобранных образцов приведены в таблице 1.

Таблица 1

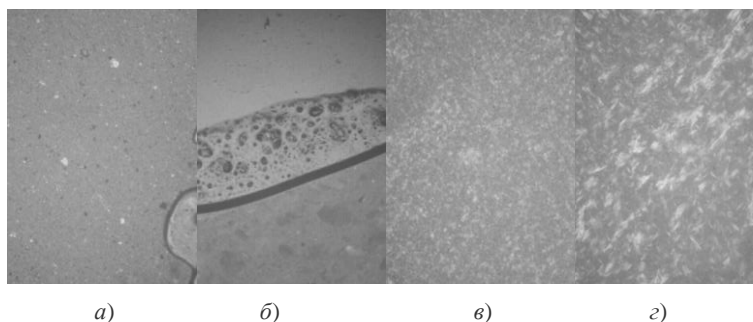
Компонентный состав и условное обозначение синтезированных пластичных смазок

Условное обозначение смазки	Тип смазки	Компонентный состав пластичных смазок			
		дисперсионная среда	% масс.	загуститель	% масс.
М-1	Мыльная	Отгон шлама	85	Стеарат кальция	15
М-2	Мыльная	Регенерированное масло	47	Стеарат кальция	16
		Отгон шлама	37		
У-1	Углеводородная	Регенерированное масло	63	Парафин	37
У-2	Углеводородная	Регенерированное масло	31,5	Парафин	37
		Отгон шлама	31,5		
У-3	Углеводородная	Регенерированное масло	70	Петролатум	30
У-4	Углеводородная	Регенерированное масло	41	Петролатум	30
		отгон шлама	29		

Полученные смазки проявляют высокие адгезионные свойства к металлу, хорошо удерживаются на наклонных и вертикальных поверхностях. Для пластичных смазок характерен длительный период формирования стабильной структуры («время созревания» 10...14 дней), во время которого их свойства (температура каплепадения, пенетрация и др.) значительно изменяются, в связи с этим определение основных эксплуатационных характеристик осуществляли по прошествии «времени созревания».

Структура полученных смазок исследовалась по ГОСТ 9270-86 на микроскопе «Axiovert-10» в тонком слое смазки в отраженном поляризованном свете при увеличении 100 крат.

На рисунке 4 представлены микроснимки синтезированных смазок М-1, М-2, У-3, У-4.

Рис. 4. Микроснимки синтезированных смазок М-1(а), М-2(б), У-3(в), У-4(з) при увеличении 100^х

Установлено, что структура углеводородных смазок анизотропна и мелкодисперсна, однако изучить структурированную дисперсию, образованную трехмерным каркасом стеарата кальция, можно при увеличении более 15 000 крат. Установлено изменение структуры углеводородных смазок на петролатуме при вовле-

чении в них отгона шлама, смазка У-4 (рис. 4, з) имеет более крупные равномерно распределенные анизотропные кристаллы в отличие от смазки без отгона шлама У-3 (рис. 4, в). Можно предположить, что отгон шлама проявляет себя в смазке как ПАВ, увеличивая число центров дисперсионного взаимодействия.

Для сравнительного анализа показателей качества и условий эксплуатации синтезированных пластичных смазок выбраны промышленно производимые аналоги – мыльная смазка общего назначения Солидол Ж (ГОСТ 1033-79) и углеводородные – уплотнительная вакуумная смазка (ГОСТ 38 0183) и канатная Ваерол-Э (ТУ 385901136-89).

Свойства синтезированных мыльных смазок, определенных после стадии их созревания, в сравнении с промышленно производимыми приведены в таблице 2, углеводородных – в таблице 3.

Таблица 2

Сравнительный анализ свойств синтезированных мыльных смазок с промышленно производимой смазкой

Показатели	М-1	М-2	Солидол Ж	Метод испытания
Внешний вид	однородная липкая мазь		однородная мазь без комков	визуально
Цвет	темно-коричневый	черный	коричневый	
Температура каплепадения, °С	155	91	не ниже 75	ГОСТ 6793-74
Пенетрация при 25 °С, 0,1 мм за 5 с	280	260	230-290	ГОСТ 5346-78
Кислотное число, мг КОН/г	отс.	отс.	отс.	ГОСТ 5985-79
Испаряемость, за 1 ч, % масс. не более, при				ГОСТ 9566-74
	100 °С	0,86	0,51	
	150 °С	2,50	1,57	0
Коллоидная стабильность, % масс.	12,95	12,38	не более 13	ГОСТ 7142-74
Температурный интервал применения, °С	-20...100	-20...70	-25...65	ГОСТ 5734-76

Таблица 3

Сравнительный анализ свойств синтезированных углеводородных смазок с промышленно производимыми смазками

Показатели	У-1	У-2	У-3	У-4	Вакуумная	Ваерол-Э
Внешний вид	однородная мазь				липкая каучукоподобная	однородная мазь
Цвет	светло-коричневого цвета	коричневого цвета	темно-коричневого цвета	темно-коричневого цвета	темно-коричневая	бурого цвета
Температура каплепадения, °С	38	42	51	60	не ниже 50	52...60
Пенетрация при 25 °С, 0,1 мм за 5 с	300	260	210	240	235	230...250
Испаряемость за 1 ч, % масс. не более, при						
	100 °С	0,00	10,34	0,35	0,15	–
	150 °С	2,00	11,47	1,45	1,13	–
Температурный интервал, °С	-20...30	-20...30	-20...40	-20...50	0...40	-30...50

Температура каплепадения и пенетрация смазок являются показателями, характеризующими воспроизводимость свойств в процессе производства смазок. Установлено, что как углеводородных, так и мыльных смазок температура каплепадения растет с увеличением концентрации отгона шлама в смазке, что, возможно, объясняется построением более прочного структурного каркаса.

По значениям показателя пенетрации синтезированные смазки можно отнести согласно классификации смазок по консистенции (деформируемости) на сорта NLGI от 1 до 3 (от «мягкой» до «почти твердой»). Испытания на морозостойкость показали, что выбранные синтезированные смазки выдерживают испытание при температуре ниже -20 °С.

Сравнительный анализ свойств синтезированных мыльных смазок с промышленными аналогами показал, что смазка М-2 наиболее соответствует по своим характеристикам смазке Солидол Ж, однако необходимы дополнительные исследования реологических свойств (эффективная вязкость, предел прочности и др.) синтезированных смазок для подтверждения возможности их использования в качестве антифрикционных.

Из таблицы 3 видно, что синтезированные углеводородные смазки У-3 и У-4 схожи по свойствам с промышленно производимыми – уплотнительной вакуумной и канатной смазкой Ваерол-Э, по большинству показателей синтезированные углеводородные смазки соответствуют консервационной смазке ГОИ-54п (ГОСТ 3276) и канатной Е-1 (ГОСТ 15037-69).

В ходе исследований установлено, что для приготовления смазок нецелесообразно использовать в качестве дисперсионной среды только РММ, так как не образуется стабильного трехмерного структурного каркаса, смазочные композиции – полужидкие, имеют консистенцию сметаны, что не соответствует структуре пластичной смазки. Вероятно, отгон шлама, вовлекаемый в смазку, выступает в роли вязкостной присадки и частично проявляет свойства загустителя. В данном случае, вероятно, происходят изменения составляющих агрегативной комбинации при добавлении отгона шлама в объем регенерированного масла, что приводит к некоторой перегруппировке и образованию новой агрегативной комбинации, которая может существенно отличаться от исходной силами межмолекулярных взаимодействий, объемной и поверхностной активностью. Можно предположить наличие инверсии кристаллической структуры за счет взаимного перехода и переориентации структур, создаваемых молекулами парафиновых углеводородов и ПАВ, содержащимися в смеси дисперсионной среде.

Выводы. Полученные результаты исследований вовлечения регенерированного моторного масла и отгона шлама блока очистки производства высокощелочных сульфонатных присадок в дисперсионную среду углеводородных и мыльных пластичных смазок показали положительный эффект и свидетельствуют о перспективности дальнейших исследований в этом направлении. Производство смазок с использованием сырья некачественного применения позволит расширить ассортимент пластичных смазок, снизить нагрузку на окружающую среду и получить экономический эффект.

ЛИТЕРАТУРА

1. Смазочные материалы и проблемы экологии / А.Ю. Евдокимов [и др.]. – М.: ГУП Изд-во «Нефть и газ» РГУ нефти и газа им. И.М. Губкина, 2000. – 424 с.
2. Пальгунов, П.П. Утилизация промышленных отходов / П.П. Пальгунов, М.В. Сумароков. – М.: Стройиздат, 1990. – 352 с.
3. Скобельцин, А.С. Исследование возможности использования отработанных моторных масел в качестве дисперсионной среды мыльных смазок / А.С. Скобельцин, В.Л. Немец // Нефтепереработка и нефтехимия. Научно-технические достижения и передовой опыт. – 2005. – № 9. – С. 32 – 37.
4. Покровская, С.В. Пластичные смазки на основе низкомолекулярного полиэтилена завода «Полимир» ОАО «Нафтан» / С.В. Покровская, Н.В. Ощепкова, Ю.А. Булавка // Вестн. Полоц. гос. ун-та. Серия В. Промышленность. Прикладные науки. – 2009. – № 8. – С. 173 – 176.
5. Использование отработанного моторного масла и нефтеполимерных смол для образования и стабилизации эмульсий / В.Г. Бондалетов [и др.] // Нефтепереработка и нефтехимия. Научно-технические достижения и передовой опыт. – 2005. – № 2. – С. 34 – 38.
6. Смазочная композиция на основе отработавшего моторного масла / В.В. Остриков [и др.] // Химия и технология топлив и масел. – 2006. – № 4. – С. 35 – 37.
7. Мухортов, И.В., Зависимость свойств регенерированного моторного масла от глубины очистки сырья / И.В. Мухортов, Е.И. Брагина // Техническая эксплуатация, надежность и совершенствование автомобилей. – Челябинск, 1996. – С. 88 – 92.
8. Василенко, Г.Д. Переработка и использование отходов производства присадок к смазочным материалам / Г.Д. Василенко, Г.Н. Грунин. – М.: ЦНИИТЭнефтехим, 1987. – 49 с.
9. Ищук, Ю.Л. Технология пластических смазок / Ю.Л. Ищук. – Киев: Наукова думка, 1986. – 147 с.
10. Смидович, Е.В. Практикум по технологии переработки нефти / Е.В. Смидович; под ред. Е.В. Смидович и И. П. Лукашевич. – М.: Химия, 1978. – 288 с.

Поступила 28.06.2012

USE OF RECYCLED WASTED MOTOR OIL AND ORGANIC SLUDGE IN THE PRODUCTION OF SOAP AND HYDROCARBON GREASES

S. POKROVSKAYA, Y. BULAUKA, A. BOGDANOVICH, A. ZUBOVA

This article is devoted to actual theme, such as involving of secondary resources into production of soap and hydrocarbon greases, they are wasted motor oils and organic sludge. Wastes which are not regenerated due to their physicochemical properties are dangerous environmental pollutants. The possibility of using used motor oils treated and organic sludge as dispersion medium in production of soap and hydrocarbon greases was investigated. Scientific-production task of repeated use of wasted oils and organic sludge is given.

УДК 628.336.515

ОБОБЩЕНИЕ ДАННЫХ ПО КИНЕТИКЕ МЕТАНОГЕНЕЗА ОТХОДОВ ОЧИСТНЫХ СООРУЖЕНИЙ

*д-р техн. наук, проф. Г.Н. АБАЕВ,
канд. техн. наук, доц. Р.А. АНДРЕЕВА, Л.П. ШЕВЧЕНКО
(Полоцкий государственный университет)*

Рассматривается применение уравнения Моно – Герберта для описания и обобщения кинетики органосодержащих отходов и их различия. Показаны возможные различия кинетических констант для отходов очистных сооружений, являющихся важнейшей кинетической характеристикой различия отходов, существенной при выборе способа переработки и расчёте аппаратуры для неё. Несмотря на их различие, рассматривается возможность обобщения кинетических констант для разнообразных отходов. На основе обобщения для определённого типа отходов показано, что при их метаногенезе максимальная конверсия не превысит 66 %. Оставшаяся после метаногенной обработки органика не соответствует первоначальной и обладает другими, полезными для глубокой переработки свойствами: лучше обезвоживается, подвергается термическому разрушению при более низкой температуре, при пиролизе даёт пирогаз, в котором меньше углекислоты и больше углеводородов. Таким образом, метаногенная обработка отходов – закономерная, необходимая стадия КПОО, которая позволит, не расходуя биогаз, поддерживать жизнедеятельность метаногенной стадии за счёт горячей воды, полученной на стадии термодеструкции оставшейся после метаногенеза органики отходов.

Для технологических расчётов стадий КПОО необходимы знания их кинетических закономерностей [1; 2]. Особенно необходимо знание кинетики для выбора начальной концентрации субстрата, определения времени пребывания и габаритов метантенка, а также для оценки диффузионных ограничений и требований к перемешиванию. Это тем более важно потому, что процесс метаногенеза медленный, требует значительных габаритов для метантенка и поэтому искать пути повышения эффективности и ускорения метаногенеза – важная практическая задача.

Основную сложность для моделирования кинетики анаэробного сбраживания представляет стадийность процесса, ограничивающая возможность использования классических уравнений ферментативной кинетики Моно и Михаэлиса – Ментен для формального описания одновременно протекающих стадий – кислотного гидролиза и щелочного сбраживания субстратов. Один из вариантов формального учета единовременности и взаимного влияния процессов кислото- и метанообразования основан на введении функции субстратного ингибирования. Важной особенностью периодических процессов анаэробной ферментации в сравнении с непрерывными является отсутствие притока свежего питательного субстрата. Отличаются также и скорости развития микроорганизмов кислотной ($ч^{-1}$) и щелочной ($сут^{-1}$) стадий. Поэтому скорость реакций преобразования органического вещества отходов зависит от скорости отмирания микроорганизмов отдельных стадий, что требует учета в кинетической модели. Помимо названных особенностей следует учитывать сложность контроля концентрации биомассы в ферментационной среде (крупность микроорганизмов составляет менее одного микрона), а также ее крайне незначительный прирост.

Основная часть. Объектом исследования в лабораторных условиях стали разнообразные органосодержащие отходы, но наиболее подробно исследовались отходы промышленных очистных сооружений нефтепереработки (ОАО «Нафтан») и нефтехимии (ОАО «Полимир») города Новополоцка [3]. При этом отходы, поступив на сооружения биохимической очистки (аэротенки, биофильтры), подвергаются окислительной деструкции в разной степени.

Исследовались также смеси отходов нефтеперерабатывающей промышленности (ОАО «Нафтан») с растительными, в частности картофельной кожурой, измельченной до крупности 0,5 мм. Смесь готовилась путем добавки растительных отходов к основной массе отходов очистных сооружений ОАО «Нафтан» из соотношения 1:10 по массе. Следует отметить непостоянство состава отходов такого рода.

Анализ всех вышеназванных особенностей позволил выбрать в качестве наиболее приемлемого варианта описания кинетики периодической анаэробной ферментации уравнение Герберта [4]:

$$-\frac{dS}{d\tau} = \frac{K_1 \cdot S}{1 + K_2 \cdot S} + K_3, \quad (1)$$

где S – содержание органического вещества в отходах, г/г; τ – время, сут; K_1 – константа скорости преобразования органического вещества, (г/г сут); K_2 – константа сорбционного ингибирования процесса, г/г; K_3 – константа скорости торможения процесса за счет отмирания бактерий, г/г сут.

Для получения методики расчета кинетических констант анаэробной ферментации по экспериментальным данным преобразуем (1) следующим образом:

$$\begin{aligned} -\frac{dS}{d\tau} &= \frac{K_1 S + K_3}{1 + K_2 \cdot S}; \Rightarrow \\ -\frac{dS}{d\tau} &= \frac{(K_1/K_2)S + (K_3/K_2) + K_3 \cdot S}{1/K_2 + S}, \end{aligned} \quad (2)$$

введя замену $K_1/K_2 = K_4$; $1/K_2 = K_5$, получаем:

$$\begin{aligned} -K_5 + S \frac{dS}{d\tau} &= K_4 S + K_3 \quad K_5 + S; \\ \frac{K_5 dS}{S + \frac{K_3}{K_4}} + \frac{S \cdot dS}{S + \frac{K_3}{K_4}} &= -K_4 d\tau; \\ \frac{K_5 dS}{S + \frac{K_3 K_5}{K_4 + K_3}} + \frac{S \cdot dS}{S + \frac{K_3 K_5}{K_4 + K_3}} &= -\frac{K_4}{K_4 + K_3} d\tau. \end{aligned} \quad (3)$$

Рассмотрим предельное состояние анаэробной обработки, соответствующее $\tau \rightarrow \infty$, $S \rightarrow S_\infty = \text{const}$, для которого (1) запишется как:

$$\frac{K_4 \cdot S_\infty}{K_5 + S_\infty} + K_3 = 0.$$

Отсюда

$$S_\infty = -\frac{K_3 \cdot K_5}{K_4 + K_3} = \alpha.$$

Введем обозначения:

$$a = \frac{K_3 K_5}{K_4 + K_3}; \quad \vartheta = K_4 + K_3.$$

Таким образом, принятое отношение констант (α) имеет физический смысл предельной массы остаточного органического вещества осадка при бесконечном времени анаэробной обработки S_∞ , дол. ед. С учетом принятых обозначений преобразуем (3):

$$\begin{aligned} K_5 \frac{d(S+a)}{S+a} + S \frac{d(S+a)}{S+a} &= -\vartheta \cdot d\tau; \\ K_5 \frac{d(S+a)}{S+a} + \frac{d(S+a) \cdot \left(\frac{dS}{d(S+a)} - a \right)}{S+a} &= -\vartheta \cdot d\tau; \\ K_5 \frac{d(S+a)}{S+a} + \frac{dS}{S+a} - a \cdot \frac{d(S+a)}{S+a} &= -\vartheta \cdot d\tau; \\ K_5 \frac{d(S+a)}{S+a} + \frac{dS}{S+a} - a \frac{d(S+a)}{S+a} &= -\vartheta \cdot d\tau; \\ \frac{d(S+a)}{S+a} \cdot (K_5 - a) + dS &= -\vartheta \cdot d\tau. \end{aligned} \quad (4)$$

Проинтегрируем уравнение (4) от 0 до τ ($S_0 \geq S \geq S_\infty$), где S_0 – начальное содержание органического вещества в составе осадка, г/г:

$$(K_5 - a) \ln \frac{S+a}{S_0+a} + S - S_0 = -\vartheta \tau. \quad (5)$$

Обозначим:

$$K_5 - a = c;$$

$$c = K_5 - \frac{K_3 K_5}{K_4 + K_3} = \frac{K_5 K_4}{K_4 + K_3}.$$

Тогда из (5) получим:

$$\ln\left(\frac{S+a}{S_0+a}\right) = S_0 - S \cdot \frac{1}{c} - \frac{v}{c} \cdot \tau, \quad (6)$$

или в общем виде нелинейная зависимость:

$$\tau = \frac{1}{v} \cdot (S_0 - S) - \frac{c}{v} \ln\left(\frac{S+a}{S_0+a}\right). \quad (7)$$

Для периодического процесса на момент его завершения: $\tau = \tau_k$, где τ_k – длительность процесса, сут; S_k – содержание остаточного органического вещества в составе сброженных отходов, г/г, (6) имеет вид:

$$\ln\left(\frac{S_k+a}{S_0+a}\right) = S_0 - S_k \cdot \frac{1}{c} - \frac{v}{c} \tau_k.$$

Обозначив

$$\frac{\ln\left(\frac{S_k+a}{S_0+a}\right)}{S_0 - S_k} = x; \quad \frac{\tau_k}{S_0 - S_k} = y, \quad (8)$$

запишем (6) в виде линейной зависимости:

$$y = \frac{1}{v} - \frac{c}{v} x.$$

Определение кинетических констант прямых и обратных биохимических реакций ферментации (K_1, K_2, K_3) начинается с уточнения остаточной величины беззольного вещества в образцах отходов (a), несброженного на 35 суток. Эту процедуру проводили двумя способами обработки экспериментальных данных по принятому кинетическому уравнению (6). Расчет осуществлялся на ЭВМ с использованием пакета «Statistika» (нелинейная форма кинетического уравнения (7)) и «Excel» (линейная форма кинетического уравнения (8)). При этом задавался перебор значений ($a = -S_\infty$) от нуля до значения конечной концентрации органического вещества в отходах на последние сутки протекания процесса (S_k). Так как максимальные скорости превращения беззольного вещества наблюдаются в первые сутки метаногенеза, при подборе данных используется большее количество точек на начальном участке развития процесса для улучшения качества формального описания кинетической кривой (рис. 1).

Искомое значение остаточной концентрации органического вещества принимается при достижении максимальной сходимости экспериментальных и расчетных значений обрабатываемых функций или при максимальном значении коэффициента корреляции ($\max R^2$).

Используя экспериментальные (данные при рассчитанном $a = -S_\infty$), две предложенные выше формы записи кинетического уравнения анаэробного сбразивания (нелинейная (7) и линейная (8) зависимости) позволяют автоматически определить коэффициенты уравнений c и v .

Применяя ранее введенные формулы для замены коэффициентов уравнений, можно рассчитать кинетические константы уравнения анаэробной ферментации (1) из следующей системы уравнений:

$$\begin{cases} K_4 = \frac{v \cdot c}{c + a}; \\ K_3 = \frac{v \cdot a}{c + a}; \\ K_5 = c + a \end{cases} \text{ и } \begin{cases} K_1 = K_4 / K_5; \\ K_2 = 1 / K_5. \end{cases}$$

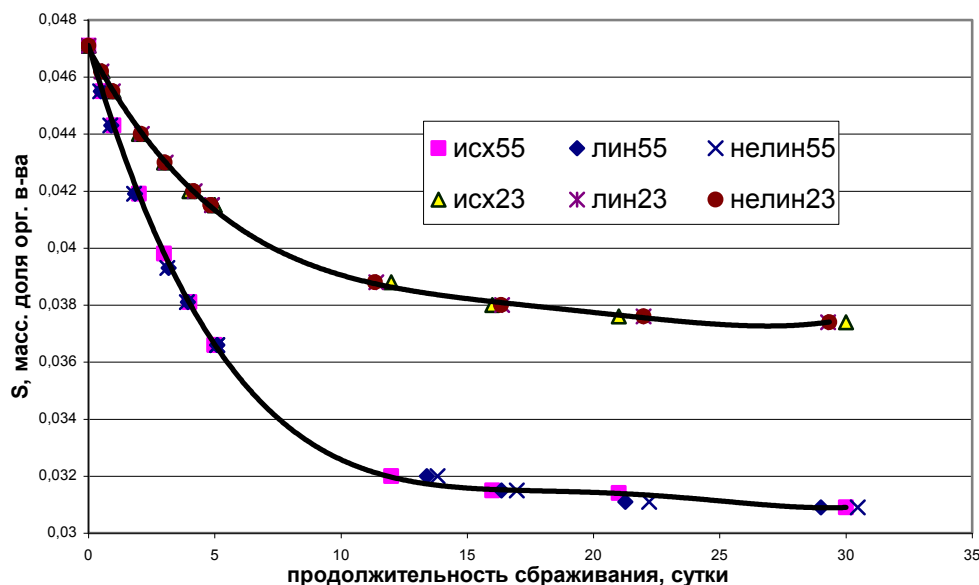


Рис. 1. Изменение беззольного вещества смеси отходов во времени ($S_0 = 4,71$ % масс; верхняя кривая при $+23$ °C для исходных данных и данных, рассчитанных по уравнениям в линейной и нелинейной форме; нижняя соответственно при температуре сбраживания $+55$ °C)

Результаты экспериментов показали закономерный характер изменения концентрации органического вещества в составе анализируемых отходов в процессе анаэробной обработки. Экспоненциальный характер зависимостей (см. рис. 1), полученных для различных температур, подтверждает возможность описания кинетики процесса уравнением Герберта (1).

Экспериментальные и расчетные данные кинетики анаэробной ферментации отходов различного происхождения и разного состава представлены в таблице 1.

Таблица 1

Отход и его состав (влажность/органическое вещество, дол. ед.)	Эксперимент		Расчет			
	температура сбраживания, °C $\pm 1,5$	конверсия беззольного вещества, %	константы			
			a , дол. ед.	K_1 , г/г сут	K_2 , г/г	$-K_3$, г/г сут
Отходы нефтепереработки 0,963/0,0245	23	22,45	0,0171	0,001767	40,47	0,000098
	33	33,88	0,0161	0,029631	30,79	0,00095
	55	37,55	0,01525	0,030301	34,00	0,00096
Отходы нефтепереработки 0,945/0,0378	23	10	0,03530	0,001097	25,23	0,00035
	33	18	0,03195	0,005901	23,22	0,00073
	55	21,6	0,02914	0,031085	18,88	0,00201
Смесь отходов нефтепереработки с растительными отходами 0,933/0,0471	23	23	0,0373	0,048261	11,59	0,00317
	33	32	0,03232	0,055011	8,08	0,00228
	55	36	0,03084	0,111769	6,90	0,00438
Отходы нефтехимии 0,961/0,0278	23	28,78	0,0168	0,01459	18,89	0,00036
	33	38,13	0,0157	0,04785	6,92	0,00084
	55	48,92	0,0135	0,08082	1,67	0,00112

Анализ зависимости константы скорости прямой биохимической реакции K_1 от температуры ферментации показывает увеличение K_1 с ростом температуры от 23 до 55 °C для всех анализируемых отходов. Самые большие значения данной константы определены для смеси отходов очистных сооружений ОАО «Нафтан» с растительными отходами. На отходах ОАО «Полимир» значение K_1 значительно выше, чем на отходах нефтепереработки: при высокой температуре ($+55$ °C) – в 2,5 раза; при 23 °C в десятки раз. Как следует из кинетики, на процесс анаэробного сбраживания (кинетическая область) влияет как сорбционное торможение субстратом (K_2), так и торможение продуктами метаногенеза (K_3), которое растет (как и K_1) с ростом температуры биохимической реакции. Константа K_2 , характеризующая скорость сорбционного ингибирования субстратом, несколько растёт с ростом отношения О/Н (табл. 2). Более высокие значения K_1 наблюдаются на отходах ОАО «Полимир».

Таблица 2

Значение кинетических констант анаэробного сбраживания отходов очистных сооружений нефтепереработки ОАО «Нафтан» с разной начальной концентрацией органического вещества при $T = +55\text{ }^{\circ}\text{C}$

Исходное содержание органического вещества, отношение О/Н	Кинетические константы				Конверсия
	S_0 , %; О/Н	K_1 , г/г сут	K_2 , г/г	K_3 , г/г сут	
2,45; 1,96	0,030301	34	-0,00096	0,01525	37,5
3,78; 2,19	0,031085	18,88	-0,00201	0,02914	21,6
4,05; 1,72	0,01514	12,74	-0,00061	0,0266	26
5,17; 1,76	0,03307	5,3	-0,00162	0,0389	21,4
8,55; 1,89	0,02796	4,99	-0,00176	0,0478	37,5

Анализ кинетических констант процесса показывает, что растительная добавка (картофельная кожура) оказывает на скорость анаэробного сбраживания осадков очистных сооружений действие, аналогичное действию дополнительным обогревом: увеличивает скорость прямой биохимической реакции (рост K_1), одновременно снижая сорбционное ингибирование (K_2). При этом снижение сорбционного ингибирования при 23 и 55 °С было соответственно в 2,2 и 2,7 раза, в то время как рост температуры в том же пределе на тех же отходах, но с добавкой, уменьшал ингибирование лишь на 30 %. Таким образом, растительная добавка проявляет иную эффективность в снижении сорбционного ингибирования, чем в данном случае температурный фактор.

Влияние растительной добавки сказывается на изменении значений K_3 при низких температурах в 10 раз, а при высоких в 2 раза, что приводит к снижению скорости ферментации. Причем минимум ингибирования за счет отмирания бактерий (K_3) наблюдается при температуре 33 °С. Влияние данной константы ингибирования на скорость протекания процесса также предполагается снижать за счет изменения организации процесса. Для поддержания высоких скоростей процесса мы предлагаем периодически выводить из системы часть сбраживаемых отходов и вводить растительную добавку для стимулирования процессов ферментации трудно сбраживаемых отходов нефтепереработки. При высоких концентрациях органического вещества ($S_0 > 10\%$ масс.) может наблюдаться снижение скорости анаэробного сбраживания за счет ингибирования высокой концентрации продуктов метаногенеза. Продуктами метаногенеза являются биогаз, удаляемый из метантенка, а также жидкие продукты метаногенеза. Однако ранее проведенными исследованиями была показана практическая целесообразность ведения процесса на высоких плотностях субстрата, поскольку, несмотря на торможение скоростей процесса сбраживания, итоговая производительность метантенка по целевому продукту увеличивается.

Рассмотрим предельное состояние анаэробного сбраживания.

Из уравнения (1) следует, что при ($\tau \rightarrow \infty$) $\left(\frac{dS}{d\tau} \rightarrow 0\right)$, $S_{\infty} = \frac{K_3}{K_1 - K_2 \cdot K_3} = \alpha$ постоянна для любых

начальных концентраций субстрата, но, анализируя рассчитанные значения констант, из таблицы 2 видно, что предельная концентрация органического вещества (α) имеет определенную зависимость от исходной концентрации для данных видов отходов, следовательно, постоянной может быть только предельная конверсия (X_{∞}).

Исследованиями Академии коммунального хозяйства им. К.Д. Памфилова (Москва) установлено [4], что все количество газа, выделяемое в процессе сбраживания, образуется за счет распада жиров, углеводов, белков. Как следует из данных [4], содержание жиров, углеводов и белков в органическом веществе осадков составляет 65...80 %. Остальная часть органического вещества в основном представляет собой лигниногумусовый комплекс, который в газообразовании не участвует. Также установлено, что процесс распада органических веществ осадков в анаэробных условиях влечет за собой образование гуминовых веществ, содержание которых в органическом веществе сброженного осадка достигает 25 % и более [4]. Чем выше доза загрузки, тем выше преимущества термофильного процесса по выходу газа. Как указывалось в [4], снижение влажности загружаемого в метантенк осадка при одном и том же времени пребывания обеспечивает увеличение нагрузки и, наоборот, при одной и той же нагрузке увеличивается продолжительность сбраживания. При сбраживании осадка одной и той же влажности увеличение нагрузки приводит к соответствующему снижению продолжительности сбраживания.

Итак, предел сбраживания будет зависеть не только от биохимического состава органического вещества, но и от влажности и зольности осадка, поскольку от них зависит изменение текучести и объем осадка. При удалении из осадков влаги и соответствующем повышении их концентрации происходит увеличение их зольности.

Как показано в [4], с увеличением зольности осадка снижается практический предел распада, а при увеличении зольности до 76,7 % сбраживание практически прекращается [4].

В представленной нами работе предпринята попытка получить кинетические характеристики метаногенеза отходов нефтепереработки, взятого с иловых площадок очистных сооружений нефтеперерабатывающего завода ОАО «Нафтан» г. Новополоцка. Исходные данные для кинетической обработки термофильного режима ($T = 55\text{ }^{\circ}\text{C}$) для различных начальных концентраций субстрата (от 2,45 до 8,55 % масс.) представлены в таблице 2.

Были проанализированы данные опытов для отходов очистных сооружений ОАО «Нафтан» при термофильном режиме сбраживания с разным содержанием начальной концентрации органического вещества из таблицы 1. Во всех опытах конверсия органического вещества не превышает 40 %, а предельное значение концентрации субстрата тем выше, чем выше его начальная концентрация. Это прямо указывает на то, что во всех рассмотренных отходах α различается, т.е. кинетические константы неодинаковы. В рассматриваемых опытах состав сбраживаемых отходов имеет различное отношение исходной органики к неорганике, состав отличается количеством исходного содержания влаги (W) и, соответственно, качественной характеристикой органического вещества, что объясняет различия в значениях кинетических констант. Это указывает на то, что существует некая зависимость предела сбраживания от исходного содержания органического вещества и его природы (в частности, за «старение» отходов можно условно принять безразмерную величину – изменения O/H).

Поскольку рассчитанные значения конверсии приближаются к практически полученным значениям на данных видах отходов, мы можем утверждать, что подобранные нами значения кинетических констант удовлетворительно описывают протекающий процесс анаэробной ферментации и всегда можно найти теоретическое время контактирования до заданной нам величины сбраживания.

Из уравнения (2) для $S = S_k$, можно определить необходимое τ , взяв определённый интеграл:

$$\tau = \int_{S_0}^{S_k} \frac{1 + K_2 \cdot S_i}{K_3 + S (K_1 + K_2 \cdot K_3)} dS. \quad (9)$$

Проведенные исследования показали, что для описания метаногенеза органосодержащих отходов можно использовать модификацию уравнения Герберта с кинетическими коэффициентами, учитывающими индивидуальные характеристики отходов (S_0 , W/H , O/H). Экспериментальные данные и результаты моделирования позволили установить следующее: на скорость сбраживания влияет как температурный фактор, так и исходный состав сбраживаемых отходов (органосодержащего субстрата); добавление растительных отходов в сбраживаемый продукт увеличивает скорость сбраживания (кинетический коэффициент K_1 увеличивается в 3 раза), что позволяет сократить время процесса (габариты аппарата).

Приведенные результаты подтверждают возможность использования разработанной кинетической модели для описания и прогнозирования протекания процесса анаэробного сбраживания отходов нефтепереработки, в том числе для расчета времени сбраживания, обеспечивающего требуемую величину конверсии органического вещества отходов.

Во всех 15-ти рассмотренных случаях (см. табл. 1) кинетических исследований для различных органосодержащих отходов и различных температур предельная конверсия метаногенеза составляла менее 50 %. Поэтому представляло интерес определить максимальную конверсию метаногенеза на основе обобщения всех кинетических данных.

В таблице 3 представлены результаты для всех 15-ти опытов: для различных отходов, начального содержания органики в отходах, АСВ, температур.

Сравнение проведено для максимально достигнутого (экспериментального) значения конверсии, которая вычислялась как экспериментальная конверсия:

$$X = \frac{G_0 \cdot S_0 - G_k \cdot S_k}{G_0 \cdot S_0}. \quad (10)$$

Расход шихты после метантенка составил

$$G_k = G_0 - G_0 \cdot S_0 \cdot X = G_0(1 - S_0 \cdot X).$$

Подставив G_k в (10), получим

$$X = \frac{G_0 \cdot S_0 - G_0(1 - S_0 \cdot X)S_k}{G_0 \cdot S_0} = \frac{S_0 - S_k + S_0 \cdot X \cdot S_k}{S_0}.$$

Откуда, выражая X из левой и правой частей, получим:

$$X = \frac{S_0 - S_k}{S_0(1 - S_k)}. \quad (11)$$

Для максимального, расчётного состояния

$$X_{\infty} = \frac{S_0 - a}{S_0(1-a)} = \frac{1 - \frac{a}{S_0}}{1 - a}; \quad a < S_0. \quad (12)$$

Таблица 3

Сравнение экспериментальной и максимальной расчётной конверсии X и X_{∞}

№ опы-	Характеристика продукта	S_0	a/S_0	$1 - a/S_0$	$1 - S_x$	Реальная конверсия на 35-е сутки, X , %	Предельная конверсия, X_{∞} , дол. ед., для $\tau \rightarrow \infty$ по (12); T °C
1	2	3	4	5	6	7	8
1	Отходы очистных нефтепереработки	0,0378	0,9327	0,0673	0,9647	10	0,0698; $T = 23$ °C
2	Отходы очистных нефтепереработки	0,0378	0,84514	0,1549	0,9681	18	0,1599; $T = 33$ °C
3	Отходы очистных нефтепереработки	0,0517	0,7522	0,2478	0,9611	21,4	0,2578; $T = 55$ °C
4	Отходы очистных нефтепереработки	0,0378	0,7703	0,2297	0,9707	21,6	0,2366; $T = 55$ °C
5	Отходы очистных нефтепереработки	0,0245	0,6977	0,3023	0,9829	22,45	0,3075; $T = 23$ °C
6	Смесь отходов очистных нефтепереработки с растительными добавками (картофельная кожура)	0,0471	0,79227	0,2077	0,9523	23	0,2158; $T = 55$ °C
7	Отходы очистных нефтепереработки	0,0405	0,6577	0,3423	0,9734	26	0,3516; $T = 55$ °C
8	Отходы очистных нефтехимии	0,0278	0,6054	0,3946	0,9832	28,78	0,4013; $T = 23$ °C
9	Смесь отходов очистных нефтепереработки с растительными добавками (картофельная кожура)	0,0471	0,6582	0,4418	0,969	32	0,3527; $T = 33$ °C
10	Отходы очистных нефтепереработки	0,0245	0,65865	0,3414	0,9839	33,88	0,3469; $T = 33$ °C
11	Смесь отходов очистных нефтепереработки с растительными добавками (картофельная кожура)	0,0471	0,65493	0,3451	0,9692	36	0,356; $T = 55$ °C
12	Отходы очистных нефтепереработки	0,0245	0,56	0,44	0,9521	37,55	0,462; $T = 55$ °C
13	Отходы очистных нефтепереработки	0,0855	0,5225	0,3775	0,9848	37,5	0,383; $T = 55$ °C
14	Отходы нефтехимии	0,0278	0,563	0,437	0,9844	38,13	0,4439; $T = 33$ °C
15	Отходы нефтехимии	0,0278	0,4872	0,5118	0,9865	48,92	0,5188; $T = 55$ °C

Проанализируем зависимость максимальной, расчётной конверсии X_{∞} от начальной концентрации органики S_0

Рассмотрим
$$\frac{dX}{dS_0} \rightarrow \frac{dX}{dS_0} = \frac{1}{1-a} \cdot \frac{a}{(S_0)^2}. \quad (13)$$

Откуда видно, что $\frac{dX}{dS_0}$ всегда положительно, т.е. конверсия растёт с ростом S_0 .

В таблице 3 и на рисунке 2 приведено сравнение конверсии для предельного состояния системы метаногенеза, реально достигаемого на 35-е сутки.

Используя для вычисления X_{∞} и кинетические константы всех опытов (a), мы можем обобщить и сопоставить результаты 15-ти опытов.

Реально достигнутая конверсия на 35-е сутки и расчётная конверсия по формуле (10) проиллюстрированы в таблице 3 и на рисунке 2. На рисунке 2 представлена зависимость реальной конверсии X % от расчётной X_{∞} (дол. ед.), взятых по их значениям в столбцах 7, 8 таблицы 3 для всех 15 случаев кинетических расчётов.

Как следует из выражения для зависимости между X и X_{∞} , при $X_{\infty} \rightarrow 1$, $X \rightarrow$: 66,8 %, что подтверждается практическими данными. Конверсия метаногенеза во всех случаях < 1 .

Часть непревращённой органики, прошедшей метаногенную обработку, не означает, что она осталась неизменной, побывав в метаногенной обработке. Органика в составе отходов, пройдя метаногенную обработку, приобретает новые свойства [5; 6]:

- пиролизуется при более низкой температуре;
- лучше обезвоживается;
- при её пиролизе получают пирогаз с большей калорийностью (меньшим содержанием углекислого газа);
- окислительная термодеструкция органики осуществляется при более низкой температуре.

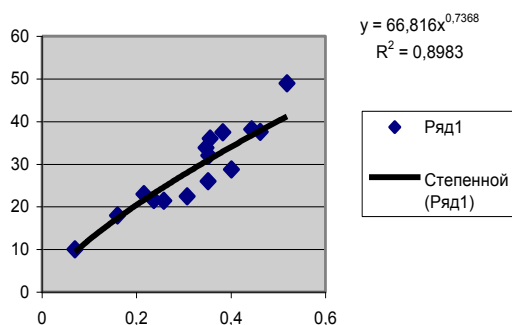


Рис. 2. Взаимосвязь реальной конверсии X и предельной конверсии X_{∞} (см. табл. 3)

Таким образом, метаногенная обработка отходов в составе КПОО перед их подачей на стадию термодеструкции является естественной и целесообразной необходимостью, позволяющей существенно улучшить ТЭП всего процесса переработки органосодержащих отходов в целом. Всё это нашло отражение в патенте [1]. Отличительной особенностью КПОО является тот факт, что биогаз, полученный на метаногенной стадии, для её жизнедеятельности не расходуется. Для этих целей используется горячая вода, полученная при охлаждении дымовых газов стадии термодеструкции. Согласно тепловому балансу теплоэнергетических источников [7], полученных на стадии термодеструкции, достаточно не только для жизнеобеспечения стадии метаногенеза, но и для поставки внешним потребителям.

ЛИТЕРАТУРА

1. Способ переработки органосодержащих отходов и установка для его осуществления: пат. № 2253 Респ. Беларусь / Г.Н. Абаев, Р.А. Андреева, С.А. Статкевич; заявитель Полоц. гос. ун-т; заявл. 03.07.1996; опубл. 30.09.1998.
2. Андреева, Р.А. Комплексная переработка органосодержащих отходов в высококалорийный топливный газ – важное направление решения экологических и энергетических задач республики Беларусь / Р.А. Андреева, Г.Н. Абаев // Обзорная информация; М-во прир. ресурсов и охраны окр. среды. – Минск, 2001. – 47 с.
3. Абаев, Г.Н. Моделирование кинетики метаногенеза органосодержащих отходов очистных сооружений / Г.Н. Абаев, Р.А. Андреева // Химическая промышленность. – СПб., 2009. – № 8.
4. Гюнтер, Л.И. Метантенки / Л.И. Гюнтер, П.П. Гольдфарб. – М.: Стройиздат, 1991.
5. Статкевич, С.А. Моделирование стадии термодеструкции комплексной переработки органосодержащих отходов: дис. ... канд. техн. наук: 05.17.08 / С.А. Статкевич. – Новополоцк: ПГУ, 1999. – 229 с.
6. Ельшина, И.А. Моделирование процессов обезвоживания в комплексной переработке органосодержащих отходов: дис. ... канд. техн. наук: 05.17.08 / И.А. Ельшина. – Новополоцк, ПГУ, 2006. – 130 с.
7. Абаев, Г.Н. Кинетика и моделирование при внедрении и повышении эффективности биогазовых установок / Г.Н. Абаев, Р.А. Андреева, И.А. Ельшина // Химическая промышленность. – СПб., 2011. – № 5. – С. 245.

Поступила 24.07.2012

SYNTHESIS OF DATA ON KINETICS OF METANOGENESIS OF TREATMENT FACILITIES WASTE PRODUCTS

R. ANDREEVA, G. ABAEV, L. SHEVCHENKO

Application of the equation Mono-Herbert for the description and generalization of kinetics of organic containing wastes and their distinction is considered. Possible distinctions of kinetic constants for waste of treatment facilities are shown. Distinction of kinetic constants is the most important kinetic characteristic of distinction of waste, important at a choice of a way of processing and calculation of equipment for it. Despite distinction, possibility of generalization of kinetic constants for various waste is considered. On the basis of generalization for a certain type of waste it is shown that at their metanogenesis the maximum conversion won't exceed 66 %. The organics remained after metanogenesis processing doesn't correspond the initial one and possesses other properties useful for deep processing: it is better dewatered, is exposed to thermal destruction at lower temperature, at pyrolysis gives gas in which there are less carbonic acids and more hydrocarbons. Owing to stated metanogenesis of waste is a natural, necessary stage of a complex recycling technology which will allow to support activity of a metanogenesis stage without spending biogas, at the expense of the hot water received at a stage of a thermodestruction remained after metanogenesis of organics of waste.

УДК 665.775.4

**ВЛИЯНИЕ ПРОДУКТА ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ РАПСОВОГО МАСЛА
С ДИЭТИЛЕНТРИАМИНОМ НА СВОЙСТВА ДОРОЖНОГО БИТУМА****канд. техн. наук, доц. А.А. ЕРМАК, Е.В. МИХАЙЛОВСКИЙ, И.А. МАНДРИКА
(Полоцкий государственный университет)**

Рассмотрены требования, предъявляемые к модифицирующим добавкам, вводимым в дорожные битумы. Приведены результаты исследования свойств продукта взаимодействия нерафинированного рапсового масла с диэтилентриамином. Предложен вероятный химический состав вышеуказанного продукта, включающий в себя комплекс поверхностно-активных веществ различных типов. Выявлена их склонность к образованию в неполярных растворителях обратных мицелл Хартли. Изучено влияние добавки исследуемого продукта на свойства дорожного битума. Показано, что при введении в битум рассматриваемый продукт оказывает на него пластифицирующее действие, увеличивая его текучесть и пенетрацию. Установлено, что продукт взаимодействия рапсового масла с диэтилентриамином повышает степень сцепления битума с поверхностью как кислых, так и щелочных минеральных материалов. Добавка исследуемого продукта к нефтяному битуму замедляет его термоокислительное старение, проявляет выраженные фунгицидные свойства и угнетающе действует на рост почвенных бактерий.

Введение. Практика эксплуатации автомобильных дорог показывает, что долговечность работы битума в составе асфальтобетонных покрытий определяется, прежде всего, его высокими пластичными, низкотемпературными и адгезионными свойствами, а также устойчивостью к термоокислительному старению. В последние годы специалисты в области дорожного строительства и нефтепереработки пришли к пониманию того, что для достижения такого комплекса показателей качества необходимы композиционные вяжущие материалы, представляющие собой смесь битумов с различными добавками: полимерными, пластифицирующими, адгезионными и пр. [1].

Для создания на основе битумов композиционных материалов с заданным комплексом свойств требуются модифицирующие добавки, обладающие следующими характеристиками:

- способностью не разрушаться при температуре приготовления асфальтобетонной смеси;
- хорошо совмещаться с битумом при проведении процесса смешивания на обычном оборудовании при температурах, традиционных для приготовления асфальтобетонных смесей;
- способностью повышать сопротивление битумов в составе дорожного покрытия к воздействию сдвиговых напряжений без увеличения их вязкости при температурах смешивания и укладки, а также не придавать битуму жесткость или ломкость при низких температурах;
- быть химически и физически стабильными и сохранять присущие им свойства при хранении, переработке, а также в реальных условиях работы в составе дорожного покрытия. При этом такие добавки должны быть доступны и относительно недороги [2].

Среди множества показателей качества битумов, влияющих на эксплуатационные характеристики и долговечность дорожных покрытий, особое место занимает адгезия, характеризующая прочность сцепления битума с поверхностью минералов. В дорожном строительстве применяются главным образом минералы кислотного типа – песчано-гравийные смеси, гранитный щебень и кварцит. Поверхностно-активные вещества (ПАВ), содержащиеся в составе битумов, также проявляют кислотные свойства. В связи с этим с целью повышения прочности сцепления битумов с поверхностью кислых минеральных материалов в их состав вводят катионоактивные ПАВ: алкилдиамины, получающиеся восстановлением водородом продуктов реакции алкиламинов с акрилонитрилом, или присадки типа ациламиноаминов и алкилимидазолинов, получающиеся при взаимодействии различных карбоновых кислот с полиэтиленполиаминами [3]. Введение в битум катионоактивных ПАВ позволяет снизить поверхностное натяжение на межфазной поверхности «битум – минеральный материал», а следовательно, улучшить и ускорить смачивание и обволакивание поверхности минералов при получении асфальтобетонных смесей.

Поверхностно-активные вещества, применяемые для улучшения сцепления битумов с минеральными материалами, влияют и на старение битумов. Катионные ПАВ способны адсорбироваться на лиофобных участках поверхности асфальтенов, блокируя места их коагуляционных контактов, приводя тем самым к стабилизации всей системы и замедлению старения битума. Как правило, при введении адгезионных добавок вязкость битума снижается [4].

В последнее время в силу нестабильности на нефтяном рынке, экономических и экологических факторов в мировом производстве ПАВ различного назначения начала преобладать тенденция к использованию воспроизводимого природного сырья, в частности растительных масел. Как правило, ПАВ растительного происхождения получают на основе предварительно выделенных и глубокоочищенных от

примесей жирных кислот или их сложных эфиров. Полученные по такой технологии продукты содержат до 100 % целевого вещества. Применение данных ПАВ технологически и экономически оправданно при производстве моющих средств, продуктов бытовой химии, косметологической и фармакологической продукции, при получении присадок и добавок к моторным топливам [5] и пр. Однако относительно высокая стоимость таких ПАВ сдерживает их широкое применение в дорожном строительстве, где не требуются столь высокая степень их очистки. В связи с вышесказанным поиск новых дешевых и высокоэффективных модифицирующих добавок к дорожным битумам на основе местных возобновляемых источников сырья является актуальной задачей.

В качестве такой добавки потенциально может быть использован продукт взаимодействия рапсового масла с диэтилентриамином (ДЭТА), по химическому составу, вероятно, представляющий собой сложную смесь амидаминов жирных кислот, их моно- и диглицеридов, глицерофосфолипидов, и их производных, а также глицерина и в небольшом количестве солей жирных кислот, токоферолов, фитостеролов и пигментов, т.е. целый комплекс ПАВ различного функционального действия.

Исследовательская часть. Цель настоящей работы – изучение влияния на свойства дорожного битума продукта взаимодействия рапсового масла с диэтилентриамином.

В качестве объектов исследований выбраны: продукт взаимодействия нерафинированного рапсового масла производства ОАО «Витебский маслоэкстракционный завод» с ДЭТА и компаундированный нефтяной дорожный битум, полученный путем смешивания в соотношении 1 к 1 по массе строительного битума марки БН 70/30 и гудрона, произведенных соответственно на установках «Битумная № 2» и «ВТ-1» ОАО «Нафтан».

Рапсовое масло представляло собой нерастворимую в воде жидкость темно-зеленого цвета со следующими свойствами: плотность при 20 °С составляет 915 кг/м³, кинематическая вязкость при 40 °С – 34,9 мм²/с, кислотное число – 5,60 мг КОН/г, йодное число – 113 г I₂/100 г, число омыления – 191 мг КОН/г, доля влаги и летучих веществ – 0,20 % масс., доля неомыляемых веществ – 1,5 % масс., температура застывания – минус 12 °С.

Синтез продукта проводился путем взаимодействия рапсового масла с ДЭТА при механическом перемешивании в массовом соотношении 4,5 к 1, в течение 30 мин при температуре (150 ± 10) °С в присутствии гидроксида калия. Условия проведения синтеза и соотношение компонентов реакционной смеси выбраны на основании результатов предварительных теоретических и лабораторных исследований. При указанном соотношении компонентов получается мазеподобный продукт с температурой каплепадения 49 °С, хорошо смешивающийся с разогретым нефтяным битумом и способствующий улучшению его свойств. Плотность синтезированного продукта при 20 °С равна 1003 кг/м³, кинематическая вязкость при 60 и 80 °С – соответственно 288 и 98,5 мм²/с.

Продукт не содержит свободных жирных кислот и воды. В неполярных растворителях молекулы, входящие в состав продукта, склонны к образованию обратных мицелл Хартли. Критическая концентрация мицеллообразования (ККМ) исследуемого продукта в толуоле находится в диапазоне 0,001...0,003 % масс.

Аминное число продукта равно 109,5 мг HCl/г, йодное число – 83,8 г I₂/100 г продукта. В результате термообработки при температуре (160 ± 1) °С в чашке Петри с толщиной слоя 5 мм в течение 1 и 2 ч аминные числа продукта не изменились, а йодные числа уменьшились до 63,7 и 55,6 г I₂/100 г продукта, т.е. на 24 и 33,6 % соответственно. Это свидетельствует о протекании реакций взаимодействия ненасыщенных жирных кислот, входящих в состав рапсового масла, по двойным связям.

Влияние содержания продукта взаимодействия рапсового масла с ДЭТА на пенетрацию и температуру размягчения битума представлены на рисунке 1. Приготовление образцов проводилось путем механического перемешивания компонентов при температуре (140 ± 10) °С в течение 30 минут. Свойства битума, определенные с помощью стандартных методик, приведены в нижепредставленной таблице.

При введении до 0,2 % масс. исследуемого продукта наблюдается рост пенетрации и температуры размягчения битума. При дальнейшем повышении содержания продукта в битуме пенетрация продолжает линейно расти, а температура размягчения падает, т.е. добавка проявляет пластифицирующие свойства. Результаты изучения текучести исходного и модифицированного битума при помощи консистометра Гепплера приведены на рисунке 2.

Установлено, что исходный и модифицированный битумы являются типично неньютоновскими жидкостями. Исследуемый продукт оказывает пластифицирующее влияние на битум – скорость сдвига возрастает, следовательно, динамическая вязкость снижается. По-видимому, структурообразующие свойства исследуемому продукту придают аминокислоты, а пластифицирующие свойства такие его компоненты, как глицериды жирных кислот, и, вероятно, их амиды, а также глицерин.

Согласно литературным данным, при изготовлении асфальтобетонных смесей в горячем виде с использованием сухого минерального материала содержание адгезионной добавки может составлять от 0,2 до 1,5 % от массы битума [6]. При использовании адгезионных добавок катионного типа с аминным числом не менее 100 мг HCl/г их расход составляет 0,3...0,5 % от массы битума [7].

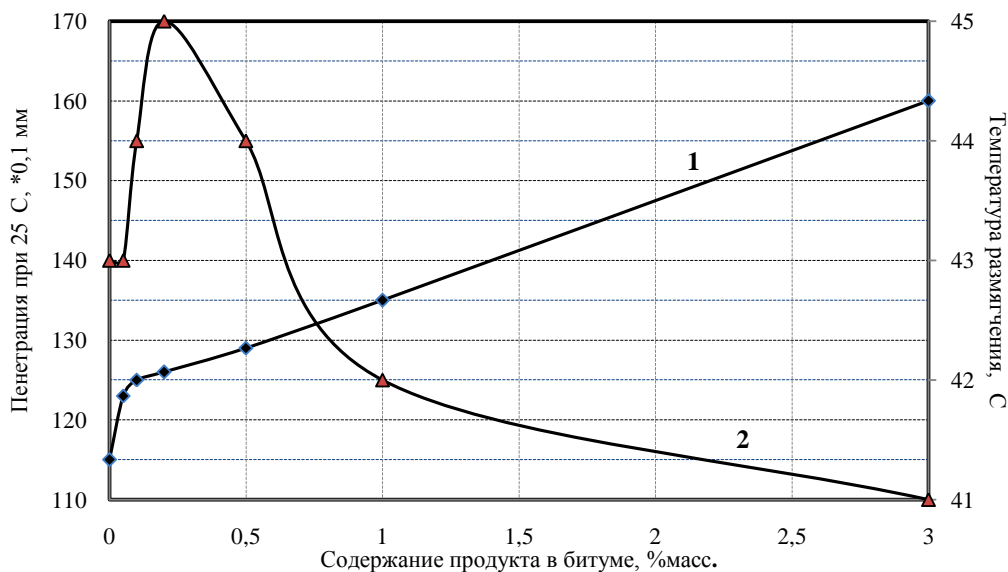


Рис. 1. Влияние содержания продукта взаимодействия рапсового масла с ДЭТА на пенетрацию (кривая 1) и температуру размягчения (кривая 2) нефтяного дорожного битума марки БНД 90/130

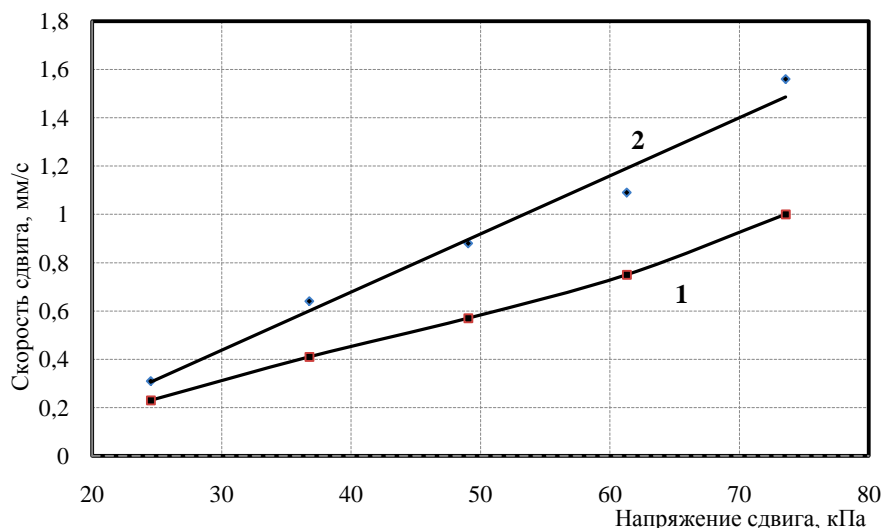


Рис. 2. Кривые текучести исходного битума (кривая 1) и битума с добавлением 0,5 % масс. продукта взаимодействия рапсового масла с ДЭТА (кривая 2) при температуре 40 °С

В связи с вышесказанным, а также с учетом того, что при добавлении к исходному битуму более 0,6 % масс. исследуемого продукта марка битума переходит из БНД 90/130 в БНД 130/200 (см. рис. 1), дальнейшие исследования проводились с содержанием исследуемого продукта 0,5 % к массе битума. Результаты изучения свойств исходного и модифицированного битума приведены в таблице.

Установлено, что исследуемая добавка замедляет термоокислительное старение битума. Так, в результате введения 0,5 % масс. исследуемой добавки изменение температуры размягчения битума в результате термообработки в условиях ГОСТ 18180-72 (5 ч при температуре (163 ± 1) °С) уменьшилось с 5 до 2 °С. При этом пенетрация исходного битума после прогрева снизилась на $19 \times 0,1$ мм, а у модифицированного битума на $14 \times 0,1$ мм.

Изучение адгезионных свойств исходного и модифицированного битумов проводилось по методу А ГОСТ 11508-74 «Битумы нефтяные. Методы определения сцепления битума с мрамором и песком». В свежеприготовленных образцах битумно-минеральных смесей поверхность минералов полностью покрыта битумом. Они соответствуют контрольному образцу №1 ГОСТ 11508-74. В результате обработки по методу А на образцах, полученных с использованием исходного битума, наблюдается практически полное его смывание с поверхности как частиц мрамора, так и песка. Они соответствуют контрольному образцу № 3 ГОСТ 11508-74, т.е. поверхность минерального материала покрыта битумом менее чем на $\frac{1}{4}$. При добавлении исследуемого продукта наблюдается значительное улучшение адгезионных свойств битума.

Свойства исходного и модифицированного битума
до и после термообработки (прогрева) в условиях ГОСТ 18180-72

Показатель	БНД 90/130			БНД 90/130 + 0,5 % масс. модифицирующей добавки			
	до прогрева	после прогрева	Δ	до прогрева	после прогрева	Δ	
Температура размягчения, °С	43	48	5	44	46	2	
Пенетрация при 25 °С, ×0,1 мм	115	96	-19	129	115	-14	
Индекс пенетрации	-1,02	-0,01	1,01	-0,28	-0,02	0,26	
Растяжимость при 25 °С, см	более 100	82	-	более 100	85	-	
Температура хрупкости, °С	-20	-20	0	-21	-21	0	
Сцепление битума по ГОСТ 11508-74. Метод А	№ образца			№ образца			
	с мрамором	№ 3	№ 1	-	№ 2	№ 1	-
	с песком	№ 3	№ 1	-	№ 2	№ 1	-
Потеря массы, % масс.	0,01			0,01			

В результате обработки по ГОСТ 11508-74 (Метод А) поверхность минеральных частиц более чем на $\frac{3}{4}$ остается покрытой модифицированным битумом и соответствует контрольному образцу № 2.

По специфике химического состава битумы характеризуются низкой полярностью по сравнению с водой, в связи с чем достаточно легко вытесняются ей с поверхности минералов. Битумы, в особенности сорта с высоким показателем кислотности, проявляют тенденцию к приобретению незначительного отрицательного заряда. Поэтому проблема слабой адгезии наиболее характерна при применении кислых каменных материалов. Молекулы адгезионной добавки концентрируются на поверхности раздела «битум – каменный материал», облегчая и усиливая связь между ними.

Для улучшения сцепления битума с кислыми минеральными материалами применяют адгезионные добавки, представляющие собой молекулы поверхностно-активных веществ катионного типа. Гидрофильные положительно заряженные группы таких ПАВ прикрепляются к отрицательно заряженным участкам на поверхности каменного материала, а гидрофобные углеводородные «хвостовые части» молекул растворяются в битуме, образуя своеобразный «мост», затрудняющий вытеснение битума водой с межфазной поверхности. Таким образом, улучшение адгезионных свойств битума к поверхности кислых минералов при введении в него синтезированного продукта можно объяснить наличием в нём аминокридов жирных кислот, обладающих свойством катионных ПАВ.

Однако, как показали исследования, продукт взаимодействия рапсового масла с ДЭТА улучшает сцепление битума и с поверхностью щелочных минералов. На этот факт следует обратить особое внимание, так как в состав асфальтобетонных смесей согласно СТБ 1033-96 входят как кислые (гранитный щебень, песчано-гравийная смесь), так и щелочные компоненты (в частности, минеральные порошки, изготавливаемые из известняков, доломитов и других карбонатных горных пород). Вероятно, это связано со сложным химическим составом исследуемого продукта, например, с наличием в его составе амфолитных ПАВ, естественными представителями которых в растительном масле являются глицерофосфолипиды.

Результаты изучения влияния продукта взаимодействия рапсового масла с ДЭТА на рост плесневых грибов на питательной среде агар Сабура показали, что он обладает выраженными фунгицидными свойствами. Так, через 3 суток на контрольном образце наблюдается интенсивный рост плесневых грибов. В то же время на исследуемом образце, содержащем 1 % масс. продукта, визуально плесень отсутствует. Через 7 суток на контрольном образце рост плесени усилился, при этом отмечено появление темных участков в центре колоний плесневых грибов, свидетельствующих о спорообразовании. На исследуемом образце к этому времени появились только единичные очаги роста плесени.

Результаты изучения влияния полученного продукта на рост бактерий на питательной среде «Грм-агар» показали, что он также оказывает угнетающее действие и на рост почвенных бактерий. Так, в чашке с контрольным образцом наблюдается сплошной рост бактериальных колоний, а в чашке, содержащей около 2 % масс. исследуемого продукта, имеются участки, где рост бактерий визуально отсутствует. Это можно объяснить плохой растворимостью исследуемого продукта в питательной среде «Грм-агар» на водной основе, в связи с чем поверхность образца становится неоднородной. В местах скопления продукта почвенные бактерии не образуют колоний, т.е. исследуемый продукт, обладая устойчивостью к разложению бактериями, не оказывает заметного влияния на их развитие в водной фазе. Вероятно, это связано с химическим составом полученного продукта, в частности с содержанием в нем аминокридов $\text{RCOONHCH}_2\text{CH}_2\text{NHCH}_2\text{CH}_2\text{NH}_2$ и $\text{RCOO}(\text{NHCH}_2\text{CH}_2\text{NHCH}_2\text{CH}_2\text{NH})\text{OOCR}_1$, относящихся к катионным поверхностно-активным веществам. В естественных условиях микробные клетки обладают общим отрицательным зарядом, поэтому катионные ПАВ наиболее губительно действуют на бактерии, дрожжевые и

нитчатые грибы. Для катионных ПАВ мишенями являются карбоксильные группы аминокислот и кислых полисахаридов бактерий. Конечным результатом действия ПАВ на микробную клетку является деградация клеточной оболочки. Поверхностно-активные вещества проникают внутрь клетки, нарушая деятельность протеаз, что приводит к автолизу клеточного содержимого [8].

Следовательно, можно ожидать, что при введении в нефтяной битум продукта взаимодействия рапсового масла с ДЭТА будет способствовать повышению устойчивости материалов на его основе, в частности асфальтобетонных покрытий, кровельных и гидроизоляционных битумных мастик и пр., к биологическому разложению, не оказывая при этом негативного влияния на окружающую среду.

Проведенное исследование позволило сделать следующие **выводы**:

- в результате взаимодействия рапсового масла с ДЭТА при оптимальных соотношениях компонентов реакционной смеси получается мазеподобный продукт сложного химического состава, практически не растворимый в воде, но хорошо растворимый в толуоле и разогретом нефтяном битуме, содержащий мицеллообразующие ПАВ с высоким аминным числом;
- при введении в нефтяной битум указанный продукт оказывает на него пластифицирующее действие, повышая текучесть и, следовательно, снижая динамическую вязкость;
- добавка исследуемого продукта к нефтяному битуму замедляет его термоокислительное старение в условиях ГОСТ 18180-72;
- продукт взаимодействия рапсового масла с ДЭТА повышает степень сцепления битума как с поверхностью кислых, так и щелочных минеральных материалов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Производство нефтяных битумов / А.А. Гуреев [и др.]. – М.: Изд-во «Нефть и газ», 2007. – 102 с.
2. Худякова, Т.С. Особенности структуры и свойств битумов, модифицированных полимерами / Т.С. Худякова, А.Ф. Масюк, В.В. Калинин // Дорожная техника: ежегодный каталог-справочник. – СПб.: Издат. Дом «СЛАВУТИЧ», 2003. – С. 174 – 181.
3. Гун, Р.Б. Нефтяные битумы / Р.Б. Гун. – М.: Химия, 1989. – 152 с.
4. Кучма, М.И. Поверхностно-активные вещества в дорожном строительстве / М.И. Кучма. – М.: Транспорт, 1980. – 191 с.
5. Кулиев, А.М. Химия и технология присадок к маслам и топливам / А.М. Кулиев. – Л.: Химия, 1985. – 312 с.
6. Адгезионные добавки для битума: техн. бюл. компании AkzoNobel, 2010. – 28 с.
7. Методические рекомендации по технологии применения поверхностно-активной добавки катионного типа КАДЭМ-ВТ при устройстве асфальтобетонных покрытий: ОДМ 218.3.001-2007: утв. распоряжением Росавтодора от 22.03.2007 № 84-р. – 25 с.
8. Ставская, С.С. Биологическое разрушение АПАВ / С.С. Ставская. – Киев: Наук. думка, 1981. – 114 с.

Поступила 21.06.2012

INFLUENCE OF THE PRODUCT OF INTERACTION OF RAPESEED OIL WITH DIETHYLENTRIAMINE ON THE PROPERTIES OF ROAD BITUMEN

A. YERMAK, E. MICHAILOVSKY, I. MANDRIKA

Requirements to modifying additives introduced into the road bitumen are considered. There are results of studies of the properties of the product of interaction of unrefined rapeseed oil with diethylenetriamine. We propose the likely chemical composition of the above mentioned product, which includes a set of surface-active substances of various types. Their tendency to form reverse micelles Hartley in non-polar solvents is revealed. It is shown, that when injected into the bitumen the product under investigation has a plasticizing effect on it, increasing its flow and penetration. It is found that the reaction product of rapeseed oil with diethylenetriamine increases the degree of adhesion of bitumen with the surface of acid as well as alkaline mineral materials. The addition of the investigational product to oil bitumen slows its thermo-oxidative aging. Product of reaction of rapeseed oil with diethylenetriamine shows marked fungicidal properties and depressing effect on the growth of soil bacteria.

УДК 614.8

**АПОСТЕРИОРНАЯ ОЦЕНКА СОСТОЯНИЯ АВАРИЙНОСТИ
НА НЕФТЕПЕРЕРАБАТЫВАЮЩЕМ ПРЕДПРИЯТИИ**

Ю.А. БУЛАВКА, канд. техн. наук, доц. П.В. КОВАЛЕНКО, Е.В. СТАШЕВИЧ
(Полоцкий государственный университет);
канд. техн. наук, доц. О.О. СМИЛОВЕНКО
(Командно-инженерный институт МЧС Республики Беларусь, Минск)

Представлены результаты научно-технического исследования состояния аварийности на одном из нефтеперерабатывающих предприятий Республики Беларусь за период с 1969 по 2011 год, подготовленные на основе актов технического расследования аварий и инцидентов на опасном производственном объекте. Основываясь на методах статистического исследования (группировка и обработка данных), проанализировано количественное выражение закономерностей промышленной аварийности в конкретных условиях места и времени: проведено ранжирование по подразделениям, видам технологического оборудования, причинам и видам последствий, определена динамика по временному фактору, причинам аварий и инцидентов. Выполнен корреляционный анализ влияния объема производства на состояние аварийности. Полученные результаты могут быть основой для прогнозирования состояния аварийности, ориентиром по устранению причин их возникновения, обеспечивая наивысшую результативность от превентивных мер при наименьших затратах.

Введение. Развитие нефтеперерабатывающей промышленности сопровождается увеличением масштабов производства, мощности установок и аппаратов, усложнением технологических процессов и режимов управления производством [1]. Вследствие усложнения и увеличения объемов производства, аварии, помимо человеческих жертв, сопровождаются огромными отрицательными экологическими и экономическими последствиями. В настоящее время большое внимание уделяется вопросам обеспечения на высоком уровне промышленной безопасности, охраны труда и защиты окружающей среды. Один из возможных путей снижения риска возникновения чрезвычайных ситуаций на промышленных объектах – анализ состояния аварийности [2]. Эта процедура, являясь на сегодняшний день основополагающей в области промышленной безопасности, позволяет получать необходимую информацию для решения проблем, связанных с безопасной эксплуатацией технологических установок и других объектов нефтепереработки. Анализ статистических данных причин аварий технологических систем и оборудования и установление причинно-следственных связей позволяют оценивать фактический уровень промышленной безопасности на предприятии и принимать соответствующие превентивные меры.

Методы исследований. В данной работе проведен апостериорный анализ состояния аварийности на наиболее мощном по количеству перерабатываемого сырья нефтеперерабатывающем предприятии (НПЗ) Республики Беларусь, подлежащего учету согласно актам технических расследований аварий и инцидентов на опасном производственном объекте. В исследовании использован статистический метод, требующий сбора большого массива данных и позволяющий определить динамику по временному фактору, изучить особенности возникновения аварий и инцидентов на отдельных производствах и т.п. Статистические методы анализа аварийности разделяют на количественные, качественные и топографические. Количественный анализ обеспечивает получение фактических показателей состояния аварийности, их сравнение (сопоставление) по годам с целью выявления общих тенденций изменения. Целью качественного анализа материалов технического расследования аварий является выявление причинных факторов и установление степени влияния каждого из них на состояние аварийности. Для выявления мест с наиболее высоким риском возникновения аварий выполняют топографический анализ [3; 4].

Результаты и их обсуждение. Изучены архивные материалы и статистическая отчетность за 49 лет эксплуатации предприятия с момента пуска завода по 31.12.2011. За указанный период на заводе произошло 5 аварий и 584 инцидента (в соответствии с Законом Республики Беларусь «О промышленной безопасности опасных производственных объектов» и ГОСТ 27.002-89 к инцидентам относятся отказы, повреждения и нарушения), последствиями которых стали 6 несчастных случаев на производстве, в том числе острое отравление сероводородом.

Комиссиями по техническому расследованию к авариям второй категории, при которых произошло разрушение отдельных производственных сооружений, аппаратов и оборудования, приведшее к длительному простоем производственных мощностей, отнесены пять происшествий: пожар на установке первичной переработки нефти и взрыв в помещении компрессорной установки депарафинизации масел в 1972 году; два пожара на установках каталитического риформинга и ректификации бензина в 1973 году и пожар на установке каталитического риформинга прямогонного бензина в 1974 году.

Объем производства является традиционным показателем промышленной деятельности предприятий. Общеизвестно, что он может служить первичным маркером, очерчивающим остроту проблем в области промышленной безопасности и охраны труда (ПБ и ОТ). Для выявления воздействия производительности установок на состояние аварийности исследуемого предприятия выполнен корреляционный анализ влияния данного производственного показателя. На рисунке 1 представлено распределение числа аварий и инцидентов в зависимости от объема первичной переработки нефти с 1969 по 2011 год.

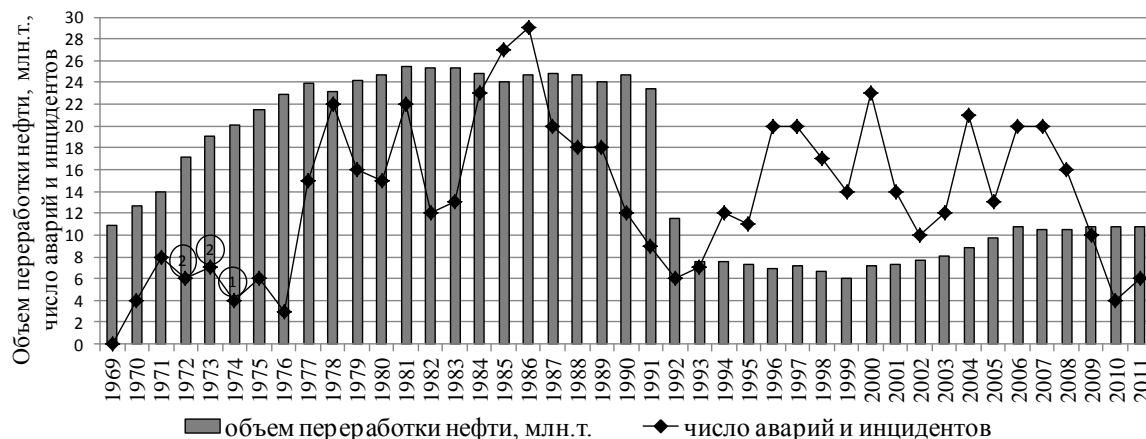


Рис. 1. Динамика объема первичной переработки нефти и числа аварий и инцидентов на НПЗ за 1969 – 2011 годы (выделены годы, в которых произошли аварии с указанием их количества)

Выявлена положительная корреляционная связь слабой силы между объемом первичной переработки нефти и количеством аварий и инцидентов на НПЗ за весь период исследования (коэффициент корреляции определен методом Пирсона и составляет 0,1857), однако в период 1969 – 1986 годов имеет место положительная корреляционная связь средней силы (коэффициент корреляции 0,6892). Таким образом, рост объемов первичной переработки нефти приводит к одновременному увеличению числа аварий и инцидентов на НПЗ. Рост числа инцидентов при резком спаде объемов переработки нефти и нефтепродуктов на НПЗ с начала 90-х годов, вероятно, обусловлен как изменением технологий, связанных с необходимостью увеличения глубины переработки нефти, расширением ассортимента и повышением качества получаемых продуктов, так и с физическим износом оборудования при недостаточном темпе модернизации действующих производств и обновления основных фондов. Установлено, что наибольшее количество инцидентов зарегистрировано в десятилетние периоды: 1980 – 1989 (33,68 %) и 2000 – 2009 годы (26,50 %), тогда как в период с 1990 по 1999 год – 21,88 %, а с 1970 по 1979 год – 15,56 %.

Распределение аварий и инцидентов в зависимости от временного фактора (месяца и дня недели) приведено на рисунке 2.

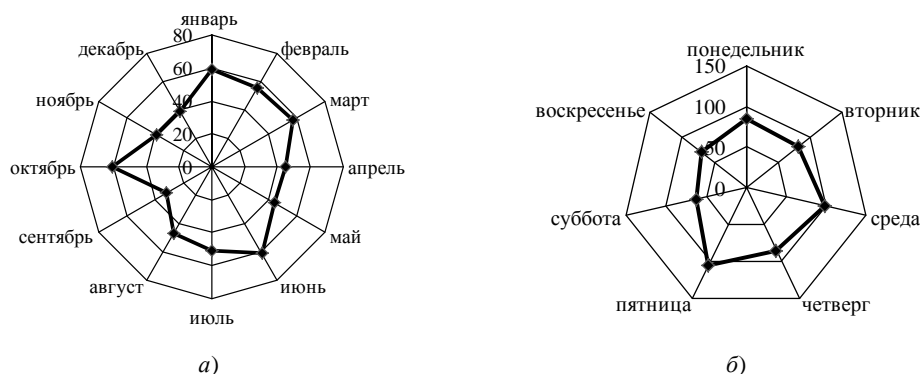


Рис. 2. Распределение числа аварий и инцидентов в зависимости от месяца (а) и дня недели (б)

Преобладающее количество аварий и инцидентов на НПЗ регистрируется в летний и зимний периоды. Вероятно, данная закономерность связана с выводом установок в летний период на плановый ремонт, реконструкцией действующих производств и выполнением других ремонтно-строительных работ. Установлено, что при выполнении пуско-наладочных работ и остановок на ремонт произошло 14,60 % анализируемых происшествий (в том числе 7,64 % при выводе установок на режим и включении в работу

оборудования). При производстве огневых и газоопасных работ зарегистрировано 4,24 % происшествий, земляных работ – 1,70 %.

Значительное количество аварий и инцидентов регистрируется в зимний период. Данный факт связан с особенностями эксплуатации НПЗ в условиях холодного климата, что обусловлено высоким риском размораживания оборудования.

Максимальное число аварий и инцидентов, как видно из рисунка 2, б, приходится на пятницу (17,97 % от общего числа), что, возможно, связано с возникновением стадии развивающегося утомления у промышленно-производственного персонала, обслуживающего технологические процессы.

Анализ публикаций по аварийности в нефтеперерабатывающей отрасли показывает, что основную опасность для промышленной территории объектов нефтепереработки представляют аварийная загазованность, пожары и взрывы, а образование взрывоопасной среды в большинстве случаев происходит из-за утечек горючей жидкости или углеводородного газа, причины которых весьма разнообразны: некачественный монтаж и ремонт оборудования; нарушение правил технологического регламента; износ оборудования; утечки продукта через прокладки, торцовые уплотнения, сальники; коррозия оборудования; переполнение промканализации; прогар труб в печах; подрыв предохранительной арматуры (ППК), переполнение емкостей, резервуаров и др.

Для установления особенностей состояния аварийности на изучаемом нефтеперерабатывающем предприятии выполнен ретроспективный анализ причин аварий и инцидентов, произошедших за период 1969 – 2011 годов, результаты которого приведены в таблице 1.

Таблица 1

Анализ причин аварий и инцидентов на НПЗ

Причины аварий и инцидентов	Виды аварий и инцидентов						
	отключение электрооборудования	остановка (отключение) технологического оборудования	пропуск продукта, загазованность	пожар	Разрушение (повреждение) оборудования	взрыв	% от общего числа
Нарушение правил технологического регламента, требований инструкций, неквалифицированные и ошибочные действия персонала, несогласованность действий, неудовлетворительное выполнение должностных обязанностей и некачественное проведение работ и т.п.	28	35	27	38	34	14	29,88
Усталостное разрушение и износ оборудования, в том числе пропуск сварного соединения и повреждение уплотнений	5	36	29	24	25	–	20,21
Отключение электроэнергии вследствие выхода из строя силового кабеля из-за старения изоляции, короткого замыкания, механического повреждения питающего кабеля и т.п.	51	30	–	9	2	2	15,96
Коррозионно-эрозионный износ	–	1	27	4	2	–	5,77
Отказ приборов КИП и А	5	18	3	4	1	–	5,26
Природные явления	4	7	10	4	1	1	4,58
Дефект завода-изготовителя (конструктивные недостатки, металлургический дефект)	2	2	4	5	3	–	2,72
Срабатывание блокировки (защиты от превышения тока, от падения напряжения, от повышения температуры, аварийная сигнализация и др.)	3	11	–	1	–	–	2,55
Пропуск ППК	1	1	5	2	–	–	1,53
Прочие	9	22	7	14	13	3	11,54

Из таблицы 1 видно, что наиболее частыми причинами аварий и инцидентов (около 30 % от общего числа) являются неквалифицированные и ошибочные действия персонала, ошибочная передача команды, несогласованность действий, низкий уровень трудовой дисциплины, недостаточный контроль за ведением работ повышенной опасности, некачественный монтаж и проведение ремонтных работ, нарушение инструкции или проекта по проведению работ, проведение огневых работ на неподготовленном месте, т.е. причины, связанные с «человеческим фактором». Данная закономерность может быть обусловлена недостаточным уровнем подготовки работников в области ПБ и ОТ, неумением принять оптимальное решение в условиях дефицита времени и психофизиологических перегрузок.

На втором ранговом месте находятся причины, связанные с выходом из строя оборудования вследствие его физического износа, а именно: усталостного разрушения и износа (7,64 %), разрушения подшипников (пар трения) (5,26 %), повреждения уплотнений насосно-компрессорного оборудования (5,09 %), пропуска сварных соединений (2,22 %).

Третье место занимают причины, обусловленные сбоями электроснабжения вследствие короткого замыкания и повреждения изоляции питающих кабелей.

Четвертое ранговое место принадлежит причинам, связанным с коррозионно-эрозионным износом оборудования, что обусловлено наличием агрессивных компонентов, присутствующих в нефти и используемых реагентах. Для нефтеперерабатывающих предприятий характерны следующие виды коррозии: точечная (питтинг), щелевая, межкристаллитная, коррозионное растрескивание под напряжением, растрескивание под действием напряжений в сульфидсодержащей среде, водородное охрупчивание, коррозия под действием щелочной воды с содержанием сероводорода, эрозия и др. [5].

По причине природных катаклизмов происходило около 5 % происшествий (ураган, воздействие грозового разряда, длительные ливневые дожди, кристаллизация продукта при низких температурах при отсутствии обогрева, размораживание оборудования и др.), а также проникновение животных на токоведущие части электрооборудования.

К остановке либо отключению оборудования (насосы, компрессоры, печи и др.) привели 27,67 % всех случаев от общего числа аварий и инцидентов; 19,02 % – к пропуску продукта; 18,34 % – к отключению электротехнического оборудования; 17,83 % – к пожару или самовоспламенению пропуска продукта; 13,75 % – к разрушению оборудования, деформации металлоконструкций, разрыву трубопроводов, прогару труб, а 3,39 % – к взрыву.

Основная причина отключений электрооборудования – старение и пробой изоляции электрокабелей и технических устройств, также ошибочные действия электротехнического персонала и повреждение электрокабелей при ведении земляных работ.

Причинами пожаров явились воспламенение или самовоспламенение нефтепродуктов при разгерметизации оборудования и коммуникаций, самовоспламенение загрязненной нефтепродуктами теплоизоляции, некачественная подготовка мест проведения огневых работ, самовоспламенение пиррофорных соединений, разряды статического и атмосферного электричества.

Большинство взрывов произошло при розжиге горелок печей в камерах сгорания и газоходах из-за нарушения порядка розжига. Имели место случаи взрывов в лотках и коллекторах самотечной системы оборотного водоснабжения, а также в емкостях, резервуарах и помещениях насосных и компрессорных при проведении огневых работ.

Разгерметизация оборудования и коммуникаций происходила по причинам коррозии металла, образования трещин сварных швов и околшовных зон, неправильного подбора или установки прокладок, недостаточной затяжки крепежа фланцевых соединений, а также разрушения подшипников насосов и электродвигателей.

Полученные данные анализа причин происшествий согласуются со статистическими данными по аварийности на Московском НПЗ, для которого нарушение режима эксплуатации технологических установок и некачественный монтаж оборудования составляют 31 % всех причин происшествий [6]. Однако на белорусском НПЗ по сравнению с московским на 10 % меньше происшествий регистрировалось вследствие износа оборудования и выброса продукта через прокладки, торцевые уплотнения, сальники, а также на 6 % меньше происшествий по причине коррозии оборудования, что, вероятно, связано с более длительной эксплуатацией Московского НПЗ.

Анализ динамики причин аварий и инцидентов, произошедших на изучаемом НПЗ за десятилетние периоды, приведен в таблице 2.

При выравнивании показателей динамического ряда изменения числа аварий и инцидентов за десятилетние периоды отмечается тенденция к их снижению по причинам, связанным с «человеческим фактором» (зависимость изменения состояния аварийности имеет линейный характер как по причинам нарушения правил технологического регламента, требований инструкций и ошибочных действий персонала ($R^2 = 0,89$), так и по причинам некачественного монтажа и ремонта оборудования ($R^2 = 0,91$)). Этот факт можно объяснить эффективно проводимой политикой предприятия в области ПБ и ОТ [4]: совершенствование работы по обучению и повышению компетентности работников в данной области; повышение уровня безопасности и т.п.

Выявлена динамика роста числа аварий и инцидентов в связи с изношенностью и выходом из строя оборудования, старением изоляции, а также коррозией оборудования, что, возможно, связано с использованием технических устройств, отработавших свой нормативный ресурс безопасной эксплуатации, невыполнением компенсирующих мероприятий по продлению сроков эксплуатации.

Уменьшается число инцидентов, обусловленных внешними и внутренними дефектами, низким качеством сварных швов, что можно объяснить совершенствованием методов неразрушающего контроля, в частности использованием физических полей излучений (акустические, магнитные, рентгеновские методы и др.).

Таблица 2

Динамика причин аварий и инцидентов за десятилетние периоды

Причины аварий и инцидентов	% от числа аварий и инцидентов за десятилетний период			
	1970 – 1979 гг.	1980 – 1989 гг.	1990 – 1999 гг.	2000 – 2009 гг.
Нарушение правил технологического регламента, требований инструкций, ошибочные действия	46,15	27,92	24,22	17,61
Некачественный монтаж и ремонт оборудования	8,79	8,12	3,13	1,89
Неудовлетворительное техническое состояние электрооборудования	4,40	9,74	10,16	25,16
Выход из строя и износ оборудования	4,40	24,87	18,75	13,21
Повреждение уплотнений	6,59	4,06	3,91	5,03
Низкое качество сварных швов	–	4,06	2,34	1,26
Коррозии оборудования	2,20	4,57	7,03	6,29
Конструктивные недостатки	6,59	3,05	1,56	2,52
Прогар труб в печах из-за местного перегрева и отложений кокса	4,40	3,05	3,13	2,52
Подрыв ППК	2,20	2,03	2,34	1,26
Неисправность приборов КИП и А	6,59	2,03	7,81	6,92
Природные явления	3,30	4,57	3,91	6,92
Проектные недоработки процесса	1,10	1,02	2,34	0,63
Прочие	3,29	0,91	9,37	8,78

На гистограмме (рис. 3) представлена динамика состояния аварийности по видам последствий аварий и инцидентов, произошедших на изучаемом НПЗ за десятилетние периоды.

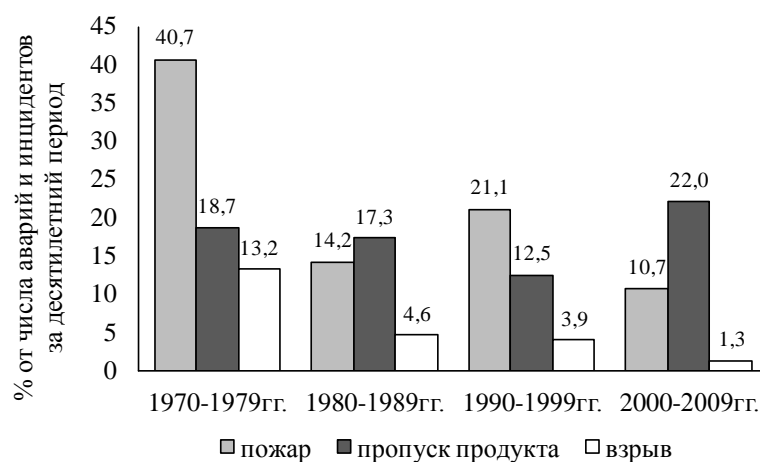


Рис. 3. Динамика состояния аварийности по видам последствий

Выявлена тенденция к снижению числа пожаров и взрывов за выбранный период наблюдения. Зависимость носит линейный характер (для пожаров $R^2 = 0,64$, взрывов $R^2 = 0,83$), что, вероятно, связано с совершенствованием работы по обеспечению пожаровзрывобезопасности оборудования и технологического процесса на предприятии.

Выполненный анализ состояния аварийности на НПЗ за период с 1969 по 2011 год в зависимости от вида технологического оборудования позволил провести сравнение полученных данных со статистическими данными по авариям в Японии [6] (табл. 3).

Ранжирование аварийности для каждого вида технологического оборудования показало, что наиболее высокая вероятность возникновения аварий и инцидентов в помещениях насосных и компрессорных – 13,58 и 14,09 % от общего числа зарегистрированных происшествий соответственно. Распределение числа аварий и инцидентов в зависимости от вида технологического оборудования в нефтепереработке разных стран отличаются. Это связано с различием применяемых технологий переработки нефтяного сырья и аппаратурного оформления процессов, уровнем оснащённости системами противоаварийной защиты, подготовки персонала и др.

Таблица 3

Анализ аварий и инцидентов в зависимости от вида технологического оборудования

Вида оборудования	Количество аварий и инцидентов, % от общего числа	
	объект исследования	японские НПЗ
Технологические трубопроводы, соединения, арматура	15,11	11,60
Помещения насосных, компрессорных	27,67	18,90
Емкости, аппаратура	13,07	15,00
Технологические печи	7,47	11,40
Ректификационные и вакуумные колонны	3,06	11,20
Промышленная канализация	1,36	8,50
Резервуарные парки	2,89	3,80
Прочие	29,37	19,60

Топографический анализ позволил определить места и участки с наиболее высокой вероятностью возникновения аварий и инцидентов. На рисунке 4 представлено распределение аварий и инцидентов по подразделениям НПЗ за период с 1969 по 2011 год.



Рис. 4. Распределение аварий и инцидентов по подразделениям НПЗ

Анализ распределения количества аварий и инцидентов по подразделениям нефтеперерабатывающего предприятия показал:

- первое место (57,56 % всех случаев) занимает основное производство нефтяных топлив и ароматических углеводородов (как наиболее многочисленное производство по числу реализуемых технологических процессов), в том числе 17,15 % зарегистрированных аварий и инцидентов связано с процессами гидроочистки дизельного топлива и керосина; по 13,92 % происшествий происходили на установках первичной переработки нефти и каталитического риформинга; 5,77 % регистрировались в процессах производства ароматических углеводородов (комплекса установок по производству бензола гидродеалкилированием толуола и ксилолов, параксилола, ортоксилола и псевдокумола и др.).

- второе ранговое место (15,79 % всех случаев) занимает основное производство смазочных масел и битумов, в том числе 3,23 % зарегистрированных происшествий выявлено на установке деасфальтизации гудрона пропаном; 2,72 % на установке вакуумной перегонки мазута; 2,38 % связано с процессами депарафинизации масел; по 1,70 % на установках селективной очистки масел фенолом и получения битумов.

- третье и четвертое ранговые места занимают вспомогательные производства нефтеперерабатывающего предприятия: цех электроснабжения (6,11 % всех случаев) и товарно-сырьевой цех (5,77 %).

Таким образом, опасность при эксплуатации разных технологических установок неравнозначна. Это обусловлено технологией, свойствами и количеством перерабатываемого сырья, плотностью размещения оборудования.

Заключение. Результаты анализа статистической отчетности и апостериорной оценки состояния аварийности на одном из нефтеперерабатывающих предприятий Республики Беларусь позволили сформулировать следующие *выводы и рекомендации*:

- за 49 лет эксплуатации предприятия произошло 5 аварий и 584 инцидента, подлежащих статистическому учету, последствиями которых стали 6 несчастных случаев на производстве;

- рост объемов первичной переработки нефти приводит к одновременному увеличению числа аварийных ситуаций, что подтверждается положительной корреляционной связью средней силы за период с 1969 – 1986 годов;

- основные причины аварий и инцидентов связаны с «человеческим фактором»;
- анализ динамики аварий и инцидентов по временному фактору (дни недели и месяцы) показал, что наиболее высок риск подобного рода происшествий в пятницу, летний и зимний периоды. Следовательно, в это время необходимо уделять больше внимания профилактической работе;
- анализ динамики состояния аварийности за десятилетние периоды позволил установить, что происходит снижение случаев пожаров и взрывов, а также аварийных ситуаций, обусловленных «человеческим фактором», что может быть связано с целенаправленной работой по предупреждению подобного рода происшествий, повышением уровня ответственности руководителей и специалистов за обеспечение безаварийной эксплуатации промышленных объектов;
- определены места с наиболее высоким риском возникновения аварийных ситуаций – это основные производства: нефтяных топлив и ароматических углеводородов; смазочных масел и битумов; на вспомогательном производстве – товарно-сырьевой цех и цех электроснабжения; высока вероятность возникновения аварий и инцидентов в помещениях насосных и компрессорных.

Поскольку обоснованность рекомендаций по безаварийной эксплуатации промышленных объектов зависит в значительной мере от объема и качества информации об инцидентах и авариях на этих объектах, разработан специализированный программный продукт, позволяющий вести учет и апостериорный анализ происшествий. Среда разработки программного продукта – Microsoft Visual Studio 2010 Express Edition, язык разработки – C#.Net. Связанные модули программного обеспечения работают под единой платформой для выдачи готового акта-отчета. Графический пользовательский интерфейс программного продукта прост и интуитивно понятен для пользователя практически любого уровня подготовленности. Сведения о происшествиях согласно актам установленных форм хранятся в базе данных. На основе имеющихся данных возможен анализ происшествий и составление ежеквартальных и ежегодных отчетов с выводом результатов в виде документа формата .doc. Кроме того, представлена возможность проведения анализа происшествий по различным показателям с выводом результатов в виде гистограмм и таблиц. В комплект программы входят шаблоны актов расследования происшествий, формирующиеся в виде файла в формате.doc. Разработанное программное обеспечение позволяет вести качественный учет происшествий и оперативно проводить их анализ с выводом результатов в виде, обеспечивающем их дальнейшее применение.

ЛИТЕРАТУРА

1. Технология и оборудование процессов переработки нефти и газа: учеб. пособие для вузов / С.А. Ахметов [и др.]. – СПб.: Недра, 2006. – 868 с.
2. Ветошкин А.Г. Мониторинг и аудит промышленной и экологической безопасности / А.Г. Ветошкин // Изв. Акад. пром. экологии. – 2004. – № 1. – С. 20 – 25.
3. Булавка, Ю.А. Роль апостериорного анализа происшествий в управлении охраной труда и промышленной безопасностью на опасном производственном объекте / Ю.А. Булавка, Е.В. Стасевич // Актуальные проблемы безопасности жизнедеятельности и защиты населения и территорий в ЧС: сб. науч. тр. по материалам междунар. науч.-практ. конф. (г. Ставрополь, 12 – 13 апр. 2012 г.). – Ставрополь: СевКавГТУ, 2012. – С. 22 – 24.
4. Артюх, А.А. Искра и пламя: исследования / А.А. Артюх, А.Ф. Иванько, В.Г. Тетерук. – Полоцк: Наследие Ф. Скорины, 2007. – 352 с.
5. Медведева, М.Л. Коррозия и защита оборудования при переработке нефти и газа: учеб. пособие для вузов. – М.: ФГУП Изд-во «Нефть и газ» РГУ нефти и газа им. И.М. Губкина, 2005. – 312 с.
6. Абросимов, А.А. Экология переработки углеводородных систем: учебник / А.А. Абросимов; под ред. М.Ю. Доломатова, Э.Г. Теляшева. – М.: Химия, 2002. – 608 с.

Поступила 06.08.2012

THE ANALYSIS OF CRASHES AND REFUSALS AT THE OIL REFINERY PLANT

Y. BULAVKA, O. SMILOVENKO, P. KOVALENKO, E. STASHEVICH

The systematic data on the frequency and causes of crashes and refusals at one of the oil refineries in the Republic of Belarus for the period from 1969 to 2011 are presented in the article. Data are based on documents of official statistics. The ranking of the number of crashes and refusals at departments, types of processing equipment, causes and types of effects is given. The dynamics of the time factor (year, month, day of week) and the causes of crashes and refusals have been determined. The results of the analysis of crashes and refusals can form the basis for prognosis of crashes and refusals and the guide how to eliminate the causes, to reduce risks and to ensure the highest efficiency of preventive measures at the lowest cost.

УДК 613.62

**АНАЛИЗ СОСТОЯНИЯ ЗДОРОВЬЯ РАБОЧИХ НЕФТЕХИМИЧЕСКИХ ПРЕДПРИЯТИЙ
ПО ПРОИЗВОДСТВУ ПОЛИЭТИЛЕНА**

**ЮСРА МОХАММЕД КВИДЖА АЛЬ-ДАЛЕМИ, д-р мед. наук, доц. П.А. ЧЕБОТАРЕВ,
канд. техн. наук, доц. В.Б. ХАЛИЛ
(Полоцкий государственный университет)**

Представлено исследование структуры, временной и частотной динамики заболеваемости с временной утратой трудоспособности рабочих, занятых в производстве полиэтилена, на примере анализа заболеваемости работников соответствующего участка завода «Полимир» ОАО «Нафтан». Показаны основные нозологические группы заболеваний. Отдельно рассмотрена структура заболеваемости вне и в рамках конкретной нозологической группы, при этом учтена динамика численности и состава рабочих исследуемого цеха.

Введение. Нефтехимическая отрасль – одна из основных компонент обрабатывающей промышленности Республики Беларусь. Значительная часть продукции нефтехимической промышленности (12,1 %) используется в производстве полимерных пластмасс и изделий из них [1]. Наиболее распространенным полимером, производимым в Республике Беларусь, является полиэтилен высокого (ПВД) и низкого (ПНД) давления [1]. Контакт с химическими веществами, образующимися при производстве полиэтилена, в сочетании с неблагоприятными условиями на рабочем месте, напряженностью и тяжестью трудового процесса может привести к различным нарушениям здоровья у работников, занятых в производстве данного полимера, в том числе к формированию профессиональных, производственно обусловленных заболеваний и обострению течения общесоматических болезней [2].

Цель данной работы – проанализировать заболеваемость с временной утратой трудоспособности работников нефтехимического предприятия, занятых в производстве полиэтилена, исследовать ее структуру и динамику во временном и частотном разрезе.

Постановка задачи. Полиэтилен низкого давления, или ПНД, используется в основном для получения упаковочной тары различного назначения, в том числе и для пищевых продуктов, емкостей хозяйственного и бытового назначения, галантерейных изделий. Полиэтилен высокого давления, или ПВД, характеризуется более широкой сферой применения – упаковочная тара различного назначения (в том числе и для упаковки лекарственных средств), игрушки, детали и узлы медицинской аппаратуры, трубы и детали оборудования холодного водоснабжения, покрытия и пленки различного назначения, изоляция электрических кабелей и др. [2].

В промышленности ПВД получают при высоком давлении путем полимеризации этилена в автоклаве или в трубчатом реакторе. Процесс в реакторе происходит по радикальному механизму под действием кислорода, органических пероксидов (лаурил, бензоил) или их смесей. Смешанный с инициатором, нагретый до 700 °С и сжатый компрессором под давлением в 25 МПа, этилен сначала поступает в первую часть реактора, где разогревается до 1800 °С, а потом во вторую – для полимеризации при температуре от 190 до 300 °С и давлении от 130 до 250 МПа. В среднем этилен находится в реакторе от 70 до 100 с. Степень превращения этилена в полимер до 20 % в каждом конкретном случае зависит от типа и количества инициатора. Из полученного полиэтилена удаляют не прореагировавший этилен, затем его охлаждают и гранулируют. Гранулы подсушивают и упаковывают. Товарный ПВД выпускают в виде неокрашенных и окрашенных гранул [2].

Полиэтилен низкого давления в промышленности получают, используя три основные технологии: полимеризацию в суспензии, полимеризацию в растворе (гексане), газофазную полимеризацию [2]. Самый распространенный способ – это полимеризация в растворе. Полимеризация в растворе проводится при температуре от 160 до 2500 °С и давлении от 3,4 до 5,3 МПа, контакт с катализатором происходит в течение 10...15 мин. Выделяется полиэтилен из раствора с помощью удаления растворителя: сначала в испарителе, затем – в сепараторе и далее в вакуумной камере гранулятора. Гранулированный полиэтилен пропаривается водяным паром. Товарный ПНД выпускают в виде неокрашенных и окрашенных гранул и иногда в порошке [2].

На основании изложенного выше целесообразно исследовать заболеваемость работников производства полиэтилена высокого давления (ПВД) как более распространенного и вредного для здоровья производства.

Наибольшую опасность для человека при производстве полиэтилена как высокого, так и низкого давления представляет исходный мономер этилен [3]. Дополнительно при традиционном способе производства ПВД возможен контакт работников с органическими пероксидами и смесями на их основе, яв-

ляющимися вспомогательными веществами при получении полиэтилена высокого давления. По биологическому действию этилен – типичный летучий наркотик, оказывает слабое раздражающее действие [3]. В производстве полиэтилена описаны случаи острых и хронических интоксикаций с симптоматикой, характерной для «винилхлоридной болезни» [3; 5].

Согласно данным исследований [4 – 9; 11], патогенез винилхлоридной болезни связывают с поражением глубинных структур мозга, и в первую очередь ретикулярной формации. Стаж работы у заболевших колеблется от 1 года до 10 лет и более в зависимости от степени загрязнения воздушной среды. В особо неблагоприятных условиях воздействия высоких концентраций винилхлорида может возникнуть острое отравление (исключительно аварийные случаи) с глубоким наркозом. При концентрациях, близких к субнаркотическим, появляются эйфория, головокружение, тошнота, нарушение координации, сонливость. Вместе с тем в [3; 10] сообщается, что за последнее время случаи острой интоксикации этиленом происходят крайне редко, и в основном в аварийных ситуациях.

Хроническая интоксикация характеризуется разнообразием жалоб: головная боль, сонливость, сменяющаяся бессонницей, жабкость и парестезии в дистальных отделах конечностей, онемение пальцев, слабость в кистях. Наблюдаются синдром Рейно, вегетативно-сосудистые кризы, в частности колебания артериального давления. Особенно часто у больных развиваются токсические полиневриты. Со стороны внутренних органов иногда наблюдаются боли и неприятные ощущения в области сердца, функциональные нарушения печени, лейкоцитоз, моноцитоз и эозинофилия, ретикулоцитоз, тенденция к эритроцитозу [4].

С целью анализа динамики и структуры производственно обусловленных заболеваний, характерных для производства полиэтилена, исследовалась заболеваемость с временной утратой трудоспособности (ЗВУТ) работающих на производстве ПВД на заводе «Полимир» ОАО «Нафтан», расположенном в г. Новополоцке в Витебской области и являющимся крупнейшим в Беларуси производителем данного полимера [1].

Для исследования проводился анализ статистических данных годовых отчетов о временной нетрудоспособности работников цеха по выпуску ПВД завода «Полимир» ОАО «Нафтан» за период с 01.01.2003 по 31.12.2011. Учитывалось общее количество заболеваний, число работников и соотношение мужчин и женщин в коллективе, количество нозологических групп заболеваний, частота возникновения заболеваний вне и в рамках конкретной нозологической группы, динамика указанных показателей во временном разрезе.

Анализ заболеваемости сотрудников завода «Полимир» ОАО «Нафтан», занятых в производстве полиэтилена. Исследование данных отчетности по заболеваемости с ВУТ показало, что за рассматриваемый период среди работников производства ПВД на заводе «Полимир» ОАО «Нафтан» не было зарегистрировано ни одного профессионального заболевания, однако в состоянии здоровья определенной категории работающих были обнаружены отклонения от нормы разной степени тяжести, что может быть признаком начальной стадии возникновения производственно обусловленных и профессиональных заболеваний.

К нозологическим группам, регистрируемым в производстве полиэтилена, относятся заболевания органов дыхания, костно-мышечной системы, системы кровообращения и сердечнососудистой системы, органов пищеварения, мочеполовой системы, кожи и подкожной клетчатки, нервной системы, эндокринной системы, глаза и его придатков, уха и сосцевидного отростка, инфекционные и паразитарные заболевания, психические заболевания и расстройства, крови и кроветворных органов, новообразования, нарушение репродуктивной функции у женщин-работниц производства ПВД, отравления и травмы на рабочем месте.

Целесообразно рассмотреть общую структуру заболеваемости с ВУТ у работников участка по производству ПВД завода «Полимир» ОАО «Нафтан». Изменения численности, состава работников приведены в таблице 1. Усредненные данные по структуре заболеваемости с ВУТ – в таблице 2.

Таблица 1

Динамика численности и состава работников завода «Полимир» ОАО «Нафтан», занятых в производстве полиэтилена

Исследуемый период, год	Общее число работников	Число женщин в коллективе
2003	891	133
2004	839	99
2005	832	83
2006	825	78
2007	822	71
2008	819	71
2009	825	75
2010	822	75
2011	819	77

Как видно из данных таблицы 1, численность работников участка по производству ПВД рассматриваемого завода за исследуемый период менялась незначительно, с 2003 по 2008 год наблюдалось устойчивое уменьшение количества работников, а с 2009 по 2011 год – как увеличение, так и уменьшение, в обоих случаях незначительное. При этом количество женщин среди работников уменьшалось с 2003 по 2008 год, а после 2009 года постоянно незначительно увеличивалось и в 2011 году составило 77 человек. Доля женщин в коллективе работников при этом составляла 14,92 % в 2003 году и 9,4 % в 2011 году.

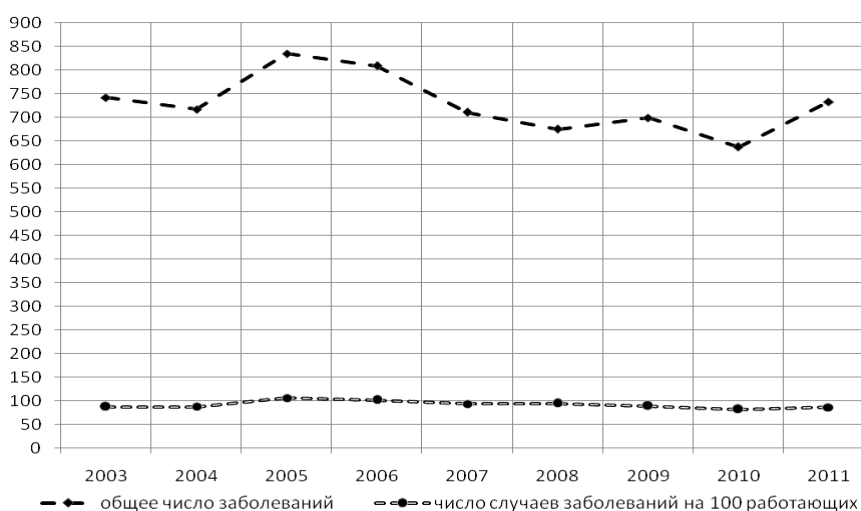
Таблица 2

Заболееваемость с ВУТ работников завода «Полимир» ОАО «Нафтан», занятых в производстве полиэтилена, за период с 2003 по 2011 год

Нозологическая группа	Среднее число случаев заболеваемости в год	Среднее число случаев заболеваемости на 100 рабочих в год
Заболевания органов дыхания	406,22	48,37
Болезни костно-мышечной системы	102,56	12,24
Отравления и травмы на рабочем месте	79,88	9,53
Болезни системы кровообращения и сердечно-сосудистой системы	33,33	3,97
Болезни органов пищеварения	27,22	3,25
Болезни мочеполовой системы	16,33	4,1
Заболевания кожи и подкожной клетчатки	14,22	1,68
Болезни глаза и придатков, уха и сосцевидного отростка	21,33	2,55
Новообразования	11,44	1,37
Инфекционные и паразитарные заболевания	3,77	0,45
Психические заболевания и расстройства	5,22	0,62
Заболевания нервной системы	2,11	0,25
Заболевания эндокринной системы	1,44	0,17
Заболевания крови и кроветворных органов	0,22	0,025
Нарушение репродуктивной функции у женщин	2,44	2,83
ИТОГО	727,22	91,424

Материалы, представленные в таблице 2, свидетельствуют о том, что за рассматриваемый период наиболее часто регистрировались заболевания органов дыхания (55,85 % всех заболеваний), костно-мышечной системы (14 %), травмы и отравления на рабочем месте (10,986 %), системы кровообращения и сердечнососудистой системы (4,584 %), органов пищеварения (3,74 %), глаза и его придатков, а также уха и сосцевидного отростка (2,93 %). Заметно реже отмечались патологии мочеполовой системы (2,25 %), кожи и подкожной клетчатки (1,96 %), новообразования (1,57 %), психические заболевания и расстройства (0,72 %), инфекционные и паразитарные заболевания (0,52 %), нарушения нервной системы (0,29 %). Реже всего регистрировались нарушения репродуктивной функции у женщин (0,26 %), эндокринной системы (0,2 %), крови и кроветворных органов (0,031 %).

Общая динамика заболеваемости и численности работников завода «Полимир» ОАО «Нафтан», занятых в производстве ПВД, за рассматриваемый период показана на рисунке.



Общая динамика заболеваемости с ВУТ работников участка по производству ПВД завода «Полимир» ОАО «Нафтан»

Из рисунка видно, что число случаев заболеваний на 100 работающих за изучаемый период практически не изменялось – 86,98 в 2003 году и 85,63 в 2011 году.

Представляется целесообразным анализ структуры и динамики патологий в каждой из указанных нозологических групп по отдельности.

Нарушения функционирования органов дыхания представлены острыми респираторными инфекциями (87,84 %), гриппом (8,79 %), пневмонией (1,14 %), другими болезнями верхних дыхательных путей (1,48 %), хроническим бронхитом (0,52 %), бронхиальной астмой (0,185 %), другими патологиями органов дыхания (0,026 %, 1 случай за весь рассматриваемый период). Частота заболеваемости органов дыхания работников изучаемого производства изменялась неравномерно: от 47,14 в 2003 году до 52,11 в 2011 году, с максимумом, равным 55,41, в 2005 году, и минимумом – 41,63 в 2008 году.

Заболевания костно-мышечной системы (КМС) включают в себя артропатии и системные поражения (6,72 %), неврологические проявления нарушений функционирования шейного (7,28 %) и поясничного отделов позвоночника (62,9 %), другие заболевания КМС (23,09 %). В среднем болезни костно-мышечной системы отмечались у 12-ти работников из 100; минимальная частота патологий КМС наблюдалась в 2011 году (10,12 случаев на 100 работающих), максимальная (14,18 на 100 работающих) – в 2005 году, в целом зависимость частоты заболеваемости от времени также носила нелинейный характер.

Среди *нарушений функционирования мочеполовой системы* отмечались патологии почек (18,09 %), воспалительные болезни (6,85 %), другие заболевания женских половых органов (6,03 %), другие болезни мочевыводящих путей (69,02 %). Частота регистрации заболеваний мочеполовой системы варьировалась в пределах от 2,07 до 5,69 случаев на 100 работников. Максимальное значение было отмечено в 2007 году, минимальное – в 2011 году.

Патологии органов пищеварения были представлены следующими видами заболеваний: полости рта и слюнных желез (21,54 %), язвенная болезнь желудка и 12-перстной кишки (15,6 %), гастриты и дуодениты (17,7 %), болезни аппендикса, грыжи (17,6 %), патологии желчного пузыря (14 %), нарушения работы печени (2,48 %), прочие болезни органов пищеварения (11,07 %). Частота заболеваемости органов пищеварения за рассматриваемый период времени изменялась неравномерно, от 2,35 случаев на 100 работающих в 2011 году до 4,44 случаев на 100 работающих в 2005 году, среднее значение составило 3,25 случаев на 100 работающих.

Заболевания кожи и подкожной клетчатки за рассматриваемый период наблюдались в среднем у одного-двух работающих из ста за год. Данную нозологическую группу представляли инфекции кожи и подкожной клетчатки (46 %), а также другие (неинфекционные) заболевания кожи и подкожной клетчатки (54 %). Временная динамика для данной нозологической группы также нелинейна, наибольший уровень заболеваемости кожи и подкожной клетчатки наблюдался в 2005 году – 2,14 случаев на 100 работающих, наименьший – в 2007 году – 1,57 случаев на 100 работающих.

Среди *нарушений функционирования систем кровообращения (СКО) и сердечнососудистой системы (ССС)* преобладали заболевания, характеризующиеся повышенным артериальным давлением (35 %), патологии вен, лимфатических сосудов и другие болезни (21 %), другие болезни сердца (12,3 %), стенокардия (11,33 %), мозговые инсульты (5,33 %), хроническая ишемическая болезнь сердца (4,67 %) и патологии артерий, артериол и капилляров (5 %). Значительно реже фиксировались инфаркт миокарда и другие формы инфарктов (3 %), прочие цереброваскулярные заболевания (2 %), ревматизм (0,33 %, 1 случай за весь рассматриваемый период). Наибольший уровень данной группы заболеваний отмечен в 2006 году – 40 случаев всего, 4,84 случаев на 100 работающих, наименьший – в 2004 году (27 случаев всего; 3,23 случаев на 100 работающих).

Отравления и травмы на рабочем месте среди работников изучаемого производства ПВД включали внутричерепные травмы (в среднем 2,92 %), изолированные травмы мягких тканей (55,49 %), изолированные переломы (вывихи) (6,39 %), изолированные переломы верхних и нижних конечностей (27,12 %), множественные и комбинированные травмы (2,5 %), другие травмы нервной системы (0,14 %), ожоги, обморожения и другие воздействия (4,03 %), отравления и токсические воздействия (0,278 %), последствия травм, ожогов, обморожений (0,974 %), последствия травм головы (0,14 %, 1 случай за рассматриваемый период). В среднем в рамках рассматриваемого периода отравления и травмы на рабочем месте отмечались у 9 человек из 100 за год, реже всего данная группа нарушений состояния здоровья работающих фиксировалась в 2011 году (7,17 случаев на 100 работающих), чаще всего – в 2006 году (11,76 случаев на 100 работающих).

Динамика *болезней глаза и его придатков*, а также *уха и сосцевидного отростка* нелинейна, в течение рассматриваемого периода наблюдался как рост, так и спад уровня данной группы заболеваний, с 2009 года наблюдается устойчивый спад. Преобладают патологии глаза и его придатков (в среднем 69,8 %). Болезни уха и сосцевидного отростка в среднем составляют 30,2 %. Чаще всего данная нозологическая группа отмечалась в 2005 году (3,84 случаев на 100 работающих), реже всего – в 2007 году – 1,46 случаев на 100 работающих.

Заболевания эндокринной и кроветворной систем являются самыми редкими для работников изучаемого производства ПВД на заводе «Полимир» ОАО «Нафтан». Их частота в среднем составляет 0,17 случаев на 100 работающих и 0,025 случаев на 100 работающих соответственно. Преобладают патологии эндокринной системы, в среднем 1,44 случая за год. Максимальное количество случаев (4) зарегистрировано в 2011 году, минимальное (1) – в 2005, 2008 и 2009 годах. Заболевания крови и кроветворных органов наблюдались всего дважды за весь рассматриваемый период: в 2004 и 2011 годах. Данный факт является весьма интересным, так как в [6 – 8] отмечается, что эндокринная и кроветворная системы являются самыми уязвимыми перед воздействием вредных веществ химической и нефтехимической промышленности.

Количество выявленных у работников производства ПВД на заводе «Полимир» ОАО «Нафтан» *новообразований* за рассматриваемый отчетный период колебалось. Максимальное количество (14 случаев) зарегистрировано в 2005 году, минимальное – в 2004 году (4 случая). В общей структуре выявляемых новообразований преобладают злокачественные: в среднем 52,42 %, однако временная динамика как для общего количества, так и для соотношения злокачественных и доброкачественных образований достаточно нелинейна: в 2003, 2005, 2006, 2010 годах преобладают доброкачественные, в 2004, 2007 – 2009 годах преобладали злокачественные новообразования, в 2011 году было зарегистрировано равное количество патологий обеих категорий. Максимальное число злокачественных образований (16 случаев, или 69,57 % от общего количества) наблюдалось в 2008 году, минимальное (2 случая, или 28,57 %) – в 2010 году. При этом частота регистрации новообразований обоих типов за рассматриваемый период колебалась от 0,6 случаев на 100 работающих в 2004 году до 1,82 случаев на 100 работающих в 2009 году. В среднем в год регистрируется 11,44 случаев всего, или 1,37 случаев на 100 работающих.

Инфекционные и паразитарные заболевания у работников изучаемого производства ПВД за рассматриваемый период обнаруживались в среднем по 3,77 случаев всего и 0,45 случаев на 100 работающих в год. Максимальное количество было зарегистрировано в 2004 году (8 случаев всего, или 0,95 случаев на 100 работающих), минимальное – в 2003, 2011 годах. Данная нозологическая группа представлена туберкулезом органов дыхания (5,88 %, отмечен дважды за весь период), туберкулезом других органов (5,88 %, отмечен дважды за весь период), другими инфекционными и паразитарными заболеваниями (88,24%).

Психические заболевания и расстройства, выявленные у работников изучаемого производства ПВД, включали шизофрению (в среднем, 28 %), невротические расстройства (32 %), нейроциркуляторные, вегетативные (10 %) и прочие психические расстройства (30 %). Для данной нозологической группы характерен попеременный рост и спад до 2010 года и постепенный устойчивый спад после 2010 года до конца рассматриваемого периода. Частота выявления психических заболеваний и расстройств колебалась от 0,45 случаев на 100 работающих в 2011 году до 1,21 случаев на 100 работающих в 2006 году. Среднее значение составляло 0,62 случаев на 100 работающих.

Патологии нервной системы были представлены болезнями периферической нервной системы (55 %) и прочими заболеваниями нервной системы (45 %). В среднем регистрировалось 2 расстройства нервной системы всего и 0,25 случаев на 100 работающих в год. При этом максимальное количество (6 случаев всего и 0,67 случаев на 100 работающих) было отмечено в 2003 году, минимальное (1 случай) – в 2011 году.

Нарушение репродуктивной функции у женщин-работниц участка по производству ПВД завода «Полимир» ОАО «Нафтан» выражалось в возникновении осложнений при протекании беременности (90,9 %), симптомов и признаков отклонений от нормы развития плода (4,55 %, зарегистрированы 1 раз за весь рассматриваемый период, в 2010 году), врожденных аномалий и деформаций плода (5,5 %, зарегистрированы 1 раз за весь рассматриваемый период, в 2011 году). На 100 женщин в среднем приходилось 2,546 случаев беременности в год в рамках рассматриваемого периода. Максимальное количество беременностей в целом и на 100 работниц (8 и 11,27 соответственно) было зарегистрировано в 2008 году, минимальное (1 и 0,12 соответственно) – в 2010 году. В 2004, 2009 годах беременностей у женщин, работающих на участке по производству ПВД на заводе «Полимир» ОАО «Нафтан», не фиксировалось.

По результатам работы были сделаны следующие **выводы**:

1) за рассматриваемый период с 01.01.2003 по 31.12.2011 на участке по производству полиэтилена высокого давления (ПВД) завода «Полимир» ОАО «Нафтан» не было зарегистрировано ни одного профессионального заболевания. Однако у части работников обнаружены отклонения в состоянии здоровья, которые могут быть расценены как признаки начальной стадии возникновения профессиональных и производственно обусловленных заболеваний;

2) нозологические группы в производстве полиэтилена, выявленные в результате анализа статистических данных по заболеваемости с ВУТ, были следующими: заболевания органов дыхания, костно-мышечной системы, системы кровообращения (СКО) и сердечнососудистой системы (ССС), органов пищеварения, мочеполовой системы, кожи и подкожной клетчатки, нервной системы, эндокринной системы, глаза и его придатков, уха и сосцевидного отростка, инфекционные и паразитарные заболевания, психические заболевания и расстройства, заболевания крови и кроветворных органов, новообразования,

нарушение репродуктивной функции у женщин-работниц производства ПВД, отравления и травмы на рабочем месте;

3) наиболее часто регистрировались заболевания органов дыхания (55,85 %), костно-мышечной системы (14,1 %), травмы и отравления на рабочем месте (10,985 %), системы кровообращения и сердечно-сосудистой системы (4,58 %), органов пищеварения (3,74 %), глаза и его придатков, а также уха и сосцевидного отростка (2,93 %). При этом среди патологий органов дыхания преобладали острые респираторные инфекции и грипп, патологии костно-мышечной системы – неврологические проявления нарушений функционирования поясничного отдела позвоночника; СКО и ССС – заболевания, характеризующиеся повышенным артериальным давлением, патологии вен, лимфатических сосудов и другие болезни; органов пищеварения – заболевания полости рта и слюнных желез, болезни аппендикса, грыжи, патологии желчного пузыря; травм и отравлений – изолированные травмы мягких тканей, изолированные переломы верхних и нижних конечностей;

4) уровень общей заболеваемости с ВУТ работников изучаемого производства за рассматриваемый период изменялся незначительно. Количество выявленных заболеваний как в целом, так и в рамках основных нозологических групп в течение рассматриваемого периода изменялось по нелинейному закону, при этом в большинстве случаев максимумы регистрировались в 2004 – 2006 и 2011 годах.

ЛИТЕРАТУРА

1. Химическая и нефтехимическая промышленность Беларуси [Электронный ресурс] / Экономика Беларуси. Промышленность Беларуси. – Режим доступа: <http://1bel.com/index.php?cat=9&subcat=168>. – Дата доступа: 20.06.2012.
2. Головкин, Г.С. Проектирование технологических процессов изготовления изделий из полимерных материалов / Г.С. Головкин. – М.: Химия, КолосС, 2007. – 399 с. – (Учебники и учеб. пособия для студ. высш. учеб. заведений).
3. Косова, Л.Н. Профессиональный риск и состояние здоровья работников производства изделий из полиэтилена низкого давления: автореф. дис. ... канд. мед. наук / Л.Н. Косова. – Оренбург, 2011. – 26 с.
4. Антонюженко, В.А. Винилхлоридная болезнь – углеводородный нейротоксикоз / В.А. Антонюженко. – Горький: Волго-Вятское изд-во, 1980. – 196 с.
5. Гизатуллина, Д.Ф. Условия труда и состояние здоровья ремонтных рабочих современных нефтехимических производств: дис. ... канд. мед. наук / Д.Ф. Гизатуллина. – М., 2010. – 192 с.
6. Зотова, Т.М. Оценка и управление профессиональными рисками нарушения здоровья работающих в производствах органического синтеза: автореф. дис. ... канд. мед. наук / Т.М. Зотова. – М., 2008. – 24 с.
7. Тимерзянов М.И. Условия труда, состояние здоровья рабочих, занятых на производствах оксида этилена и синтетического каучука: автореф. дис. ... канд. мед. наук / М.И. Тимерзянов. – М., 2006. – 26 с.
8. Тухватуллина, Л.Р. Гигиеническая оценка условий труда работающих на производстве по термической переработке полиэтилена дис. ... канд. мед. наук / Л.Р. Тухватуллина. – Казань, 2003. – 168 с.
9. Пасенкова, Н.А. Вопросы гигиены труда в производстве изделий из пластмасс / Н.А. Пасенкова // Гигиена труда, состояние здоровья рабочих в химической, стекольной и других отраслях промышленности: сб. науч. работ. – М., 1980. – С. 29 – 30.
10. Вопросы гигиены труда при производстве пластмасс и их применении / А.С. Архипов [и др.] // Гигиена труда и охрана окружающей среды в химической промышленности: сб. науч. работ. – М., 1980. – С. 55 – 57.
11. Бовтюшко, В.Г. Индивидуальная оценка риска развития заболеваний в проблеме мониторинга здоровья персонала нефтехимических производств автореф. дис. ... д-ра мед. наук / В.Г. Бовтюшко. – СПб., 1996. – 41 с.

Поступила 20.07.2012

THE ANALYSIS OF STATE OF HEALTH OF WORKERS AT PETROCHEMICAL POLYETHYLENE PRODUCTION ENTERPRISES

JUSRA MOKHAMMED KVIDJA AL-DALEMI,
P. TCHEBOTARYOV, V. KHALIL

Research of the structure, temporal and frequency dynamics of sickness rate with temporary loss of ability to work of polyethylene production workers is presented on the example of sickness rate analysis of workers of the correspondent area of the plant "Polymir" JSC "Naftan". The basic nosologic groups of illnesses are shown. The structure of sickness rate within and beyond a certain nosologic group is observed separately, taking into account the dynamics of the number and membership of the workers of the department under study.

УДК 66.048

МОДИФИКАЦИЯ МЕТОДА РИАЗИ ДЛЯ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ КРИВЫХ РАЗГОНКИ НЕФТИ И НЕФТЯНЫХ ФРАКЦИЙ

С.С. ДЕМЧЕНКО, канд. техн. наук, доц. С.М. ТКАЧЕВ

Проведен анализ современных методов прогнозирования кривых разгонки нефти и её фракций. Предложен вариант модификации метода Риази. Предлагаемый вариант модификации обеспечивает повышение точности прогнозирования как температур начала и конца кипения, так и промежуточных точек во всем диапазоне температур выкипания. Разработаны алгоритмы и программа расчета. Выполнен сравнительный анализ результатов прогнозирования кривых разгонки различных нефтей и нефтяных фракций, полученных с помощью рассмотренных методик, в том числе используемых в общепризнанных зарубежных программных продуктах.

Одной из основных характеристик нефти и её фракций наряду с плотностью, содержанием серы, давлением насыщенных паров является фракционный состав. На основании данных о фракционном составе определяется направление переработки нефти, разрабатываются математические модели для проектирования новых установок, производится анализ работы действующих установок АТ, АВТ, фракционирования, блоков разделения продуктов установок гидроочистки, риформинга, изомеризации и др.

В зависимости от направления использования данных по фракционному составу они могут быть получены по различным методикам.

Так, для разработки математической модели при проектировании новых установок или анализа работы действующих необходимо располагать данными по истинной температуре кипения (ИТК), определёнными в соответствии со стандартом ASTM-D 2892 для атмосферной перегонки и стандартом ASTM-D 5236 для вакуумной перегонки.

К сожалению, анализы ИТК дистилляции нефти являются дорогостоящими и продолжительными по времени. Один анализ определения ИТК нефти может длиться 24 часа, поэтому он не может быть использован в качестве инструмента ежедневного мониторинга работы установок.

В связи с этим для проведения аналитического контроля по фракционному составу сырья, получаемых продуктов и полупродуктов на действующих установках НПЗ используют более «простые» методики: ASTM-D 86 – для светлых нефтепродуктов; ASTM-D 1160 – для темных. Данные о конце и начале кипения, полученные по этим методикам, нельзя в полной мере считать достоверными, так как они сильно зависят от скорости нагрева пробы и охлаждения паров. Кроме того, иногда требуется проведение интерполяции или экстраполяции уже имеющихся данных лабораторного анализа.

Также актуальной задачей является предсказание фракционного состава компаундированных топлив до проведения процесса компаундирования, то есть на основании данных о фракционном составе компонентов предсказать фракционный состав полученного продукта.

Все эти задачи можно решить при помощи прогнозирования поведения кривых разгонки нефти и её фракций.

Анализ существующих методов прогнозирования фракционной разгонки. Согласно проведенному авторами литературному обзору на данный момент наиболее прогрессивными методами прогнозирования поведения кривой разгонки нефти и её фракций являются следующие:

- кубический сплайн;
- канонический полином;
- метод М. Риази.

Суть метода построения кривой разгонки нефти и её фракции методом кубического сплайна заключается в следующем. Интервал интерполяции разбивается на небольшие отрезки, на каждом из которых функция задается полиномом третьей степени. Коэффициенты полинома подбираются таким образом, чтобы выполнялись определенные условия (какие именно, зависит от способа интерполяции). Общие для всех типов сплайнов третьего порядка требования – непрерывность функции и, разумеется, прохождение через предписанные ей точки. Основными достоинствами сплайн-интерполяции являются её устойчивость и малая трудоемкость [1]. Системы линейных уравнений, которые требуется решать для построения сплайнов, хорошо обусловлены, что позволяет получать коэффициенты полиномов с высокой точностью. В результате даже при очень больших количествах интервалов вычислительная схема не теряет устойчивость.

На рисунке 1 представлены результаты прогнозирования поведения кривой разгонки фракции 240...340 °С методом кубических сплайнов (табл. 1, набор данных Б).

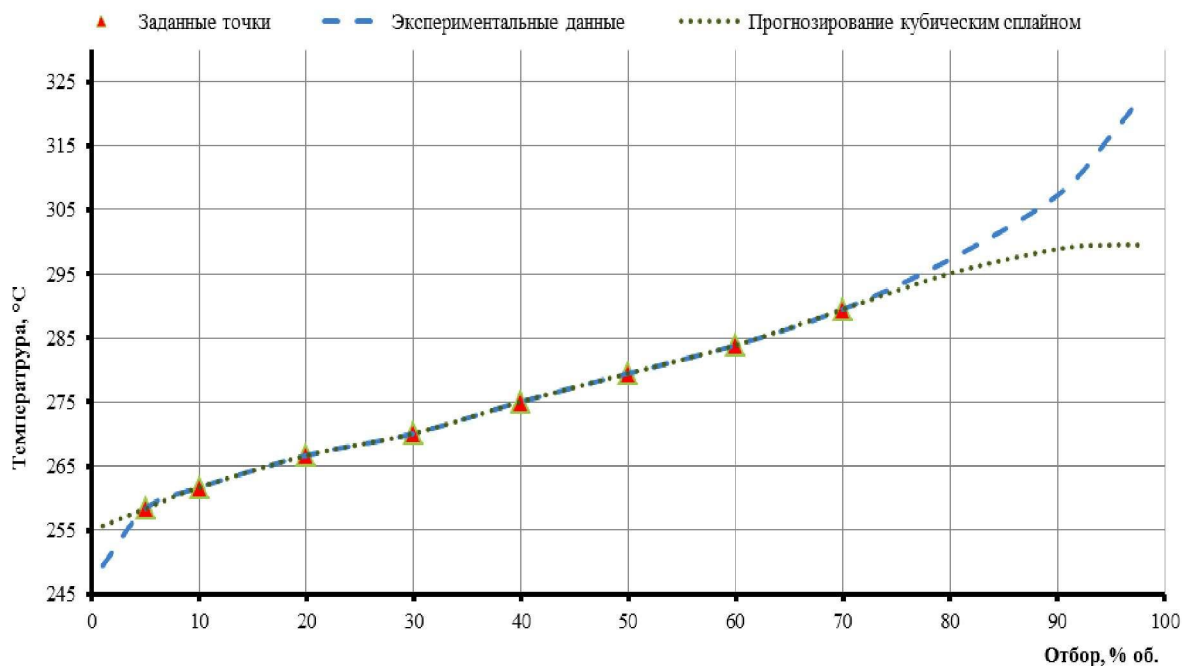


Рис. 1. Прогнозирование поведения кривой разгонки методом кубического сплайна

Как видно, данный метод позволяет с высокой степенью точности производить интерполяцию имеющихся данных, в то же время возможности экстраполяции сильно зависят от равномерности распределения экспериментальных точек.

Так, добавление к набору данных точки 90 % дистилляции значительно улучшает качество прогнозирования поведения кривой разгонки в области конца кипения (рис. 2).

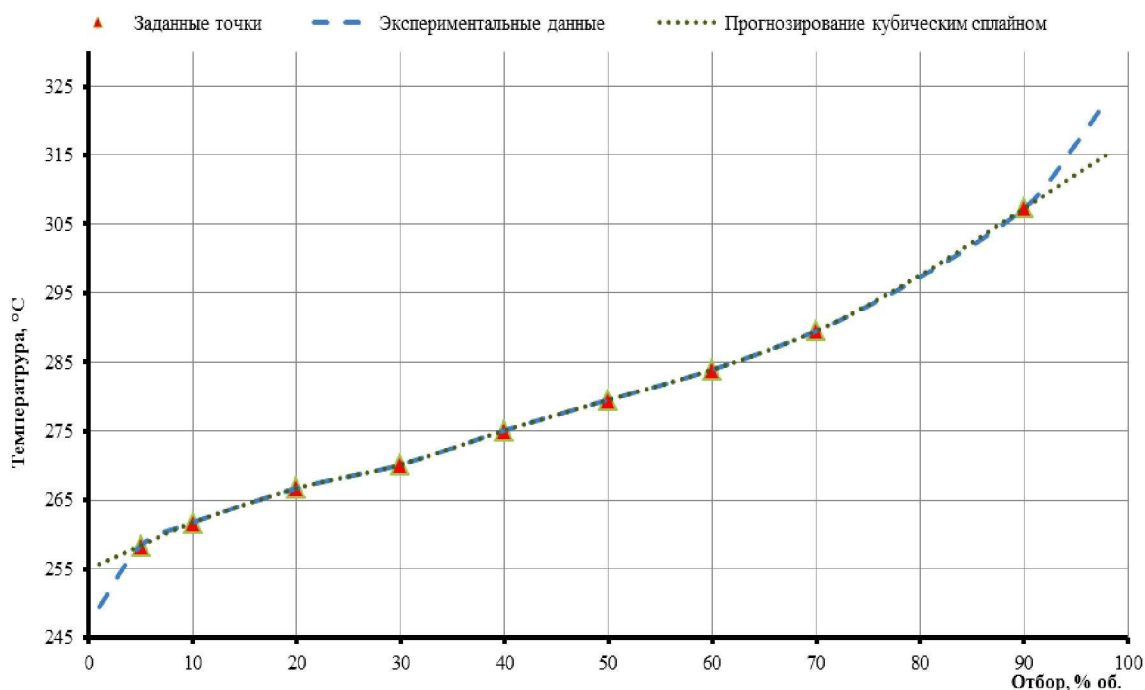


Рис. 2. Прогнозирование поведения кривой разгонки методом кубического сплайна с добавлением точки 90 % дистилляции

Данный подход используется в моделирующей программе Pro/II фирмы Invensys. Однако для прогнозирования начала и конца кипения ее разработчики используют фирменные алгоритмы фильтрации данных, отличающиеся от метода кубических сплайнов, которые в значительной степени позволяют им уйти от недостатков метода (табл. 1 набор данных Б, В), но полностью избавиться от зависимости в равномерном распределении экспериментальных данных все равно не удастся (табл. 1, набор данных Г).

Построение кривой разгонки методом *канонического полинома* заключается в следующем.

Через экспериментальные точки проводится полином вида:

$$f(x) = a_0 + a_1 \cdot x + a_2 \cdot x^2 + a_3 \cdot x^3 + \dots + a_n \cdot x^n.$$

Коэффициенты в данном полиноме находятся путем решения системы линейных уравнений. Максимальная степень полинома зависит от количества экспериментальных точек. Количество же точек, участвующих в определении коэффициентов полинома, при заданной степени полинома, должно отвечать минимальному отклонению полученных точек от экспериментальных и может быть определено методом наименьших квадратов [1]. Достоинства и недостатки данного метода аналогичны прогнозированию кубическим сплайном.

Для прогнозирования поведения кривой разгонки нефти и её фракций Риази предложил использовать зависимость следующего вида [2]:

$$\frac{T - T_0}{T_0} = \left(\frac{A}{B} \cdot \ln \left(\frac{1}{1 - x} \right) \right), \quad (1)$$

где T – температура кипения на кривой дистилляции, соответствующая объёмному или массовому выходу x , К; T_0 – температура начала кипения нефти или её фракции, К; A и B – коэффициенты в уравнении.

В случае отсутствия данных по температуре начала кипения подбор параметров A , B и определение T_0 осуществляется *итерационным методом* в следующей последовательности:

1) задаем значением T_0 , в результате чего уравнение Риази сводится к уравнению вида:

$$Y = C1 + C2 \cdot X, \quad (2)$$

$$Y = \ln \left(\frac{T - T_0}{T_0} \right), \quad (3)$$

$$X = \ln \ln \left(\frac{1}{1 - x} \right); \quad (4)$$

2) на основании экспериментальных данных и принятого значения температуры начала кипения методом линейной регрессии определяют значение коэффициентов $C1$ и $C2$;

3) из коэффициентов $C1$ и $C2$ рассчитываются коэффициенты A и B по формулам:

$$B = 1/C2, \quad (5)$$

$$A = B \cdot \exp(C1 \cdot B); \quad (6)$$

4) по найденным коэффициентам A , B и принятой температуре начала кипения T_0 , используя уравнение Риази, рассчитывают температуры кипения для экспериментальных значений x ;

5) находят отклонение рассчитанных значений от экспериментальных, если полученное значение отклонений больше принятой точности или полученной на предыдущем шаге итерации, принимают новое значение начальной температуры кипения и расчет повторяют.

Достоинство данного подхода заключается в том, что предложенная зависимость наиболее соответствует виду кривых, получаемых при экспериментальной разгонке нефти и её фракций [2].

На рисунке 3 представлены результаты прогнозирования поведения кривой разгонки фракции 240...340 °С методом Риизи (табл. 1, набор данных Б).

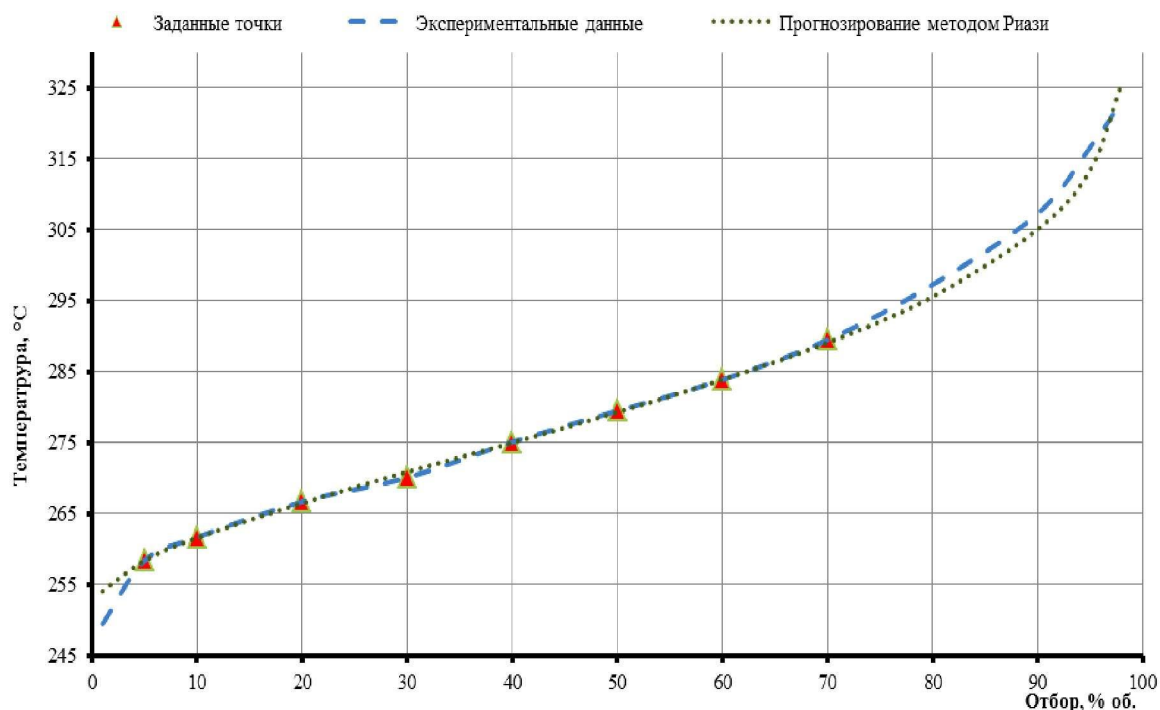


Рис. 3. Прогнозирование поведения кривой разгонки методом Риизи

Как видно, данная зависимость позволяет достаточно точно прогнозировать поведение кривой разгонки в независимости от равномерности распределения экспериментальных точек. Недостатком же метода является то, что полученная кривая непосредственно не проходит через имеющиеся экспериментальные точки, а лишь приближается к ним (см. табл. 1). Таким образом, это накладывает определенные ограничения на точность получаемых результатов.

Также следует отметить, что согласно методу, описанному Риизи, при определении температуры начала кипения используются все экспериментальные данные, в том числе и о конце кипения.

По нашему мнению, данный подход не совсем оправдан и логичнее при определении температуры начала кипения было бы использовать ближайшие точки, а не все данные.

Модификация метода прогнозирования фракционной разгонки. На основании проведенного анализа, учета достоинств и недостатков существующих методов прогнозирования кривой разгонки нефти и её фракций, предлагаем модифицировать метод прогнозирования кривой разгонки, основанный на подходах М. Риизи.

Суть предлагаемых изменений заключается в следующем:

- определение температуры начала кипения ведется не на основании всего набора экспериментальных данных, а на основании ближайших точек к началу кипения, что позволит увеличить точность прогнозирования поведения кривой разгонки в области начала кипения нефтяной фракции;

- коэффициенты A и B в уравнении (1) рассчитываются для каждой пары экспериментальных точек, что позволит увеличить точность интерполирования, и, кроме того, полученная кривая разгонки будет проходить через все заданные экспериментальные точки.

Например, мы имеем данные по температурам кипения для 10, 30, 50, 70 и 90 % выкипания нефтяной фракции. Таким образом, для определения температуры начала кипения используются точки 10, 30 и 50 %. Далее, на основании определенной температуры начала кипения рассчитываются коэффициенты A и B для каждой из пар экспериментальных точек: 10 и 30 %, 30 и 50 %, 50 и 70 %, 70 и 90 %.

Так как коэффициенты A и B подбираются для каждой пары точек и остальные экспериментальные точки не участвуют в их определении, то для каждой пары мы получаем свою собственную кривую, которая наиболее точно характеризует поведение общей кривой разгонки в данном интервале и непосредственно проходит через узловые точки.

Таблица 1

Прогнозирование поведения кривой разгонки дизельной фракции 240...340 °С, подвергнутой дистилляции по ASTM-D 86

Экспериментальные данные		Набор данных А (5, 10, 20, 30, 40, 50, 60, 70, 80, 90, 95 %)						Набор данных Б (5, 10, 20, 30, 40, 50, 60, 70 %)					
Отбор % об.	Температура выкипания, °С	Риази		Nafta		Pro/II		Риази		Nafta		Pro/II	
		Т, °С	отклон.	Т, °С	отклон.	Т, °С	отклон.	Т, °С	отклон.	Т, °С	отклон.	Т, °С	отклон.
1	249,5	255,1	5,6	254,5	5,0	251,8	2,3	254,1	4,6	253,9	4,4	251,8	2,3
5	258,4	258,5	0,1	258,4	0,0	258,4	0,0	258,4	0,0	258,4	0,0	258,4	0,0
10	261,7	261,5	0,2	261,7	0,0	261,7	0,0	261,6	0,1	261,7	0,0	261,7	0,0
20	266,7	266,4	0,3	266,7	0,0	266,7	0,0	266,5	0,2	266,7	0,0	266,7	0,0
30	270,1	270,7	0,6	270,1	0,0	270,1	0,0	270,9	0,8	270,1	0,0	270,1	0,0
40	275,1	275	0,1	275,1	0,0	275,1	0,0	275	0,1	275,1	0,0	275,1	0,0
50	279,5	279,4	0,1	279,5	0,0	279,5	0,0	279,3	0,2	279,5	0,0	279,5	0,0
60	283,9	284,2	0,3	283,9	0,0	283,9	0,0	283,9	0,0	283,9	0,0	283,9	0,0
70	289,5	289,8	0,3	289,5	0,0	289,5	0,0	289,1	0,4	289,5	0,0	289,5	0,0
80	297,3	296,8	0,5	297,3	0,0	297,3	0,0	295,6	1,7	296,5	0,8	293,4	3,9
90	307,3	307,3	0,0	307,3	0,0	307,3	0,0	305,1	2,2	307	0,3	304,7	2,6
95	316,7	316,5	0,2	316,7	0,0	316,7	0,0	313,5	3,2	316,2	0,5	317,3	0,6
98	323,1	331	7,9	327,9	4,8	329,7	6,6	325,8	2,7	327,1	4,0	325,7	2,6
Среднее отклонение:			1,25		0,75		0,68		1,25		0,77		0,92
Экспериментальные данные		Набор данных В (10, 30, 50 %)						Набор данных Г (30, 50, 70 %)					
Отбор % об.	Температура выкипания, °С	Риази		Nafta		Pro/II		Риази		Nafta		Pro/II	
		Т, °С	отклон.	Т, °С	отклон.	Т, °С	отклон.	Т, °С	отклон.	Т, °С	отклон.	Т, °С	отклон.
1	249,5	259,1	9,6	257,3	7,8	248,9	0,6	241,1	8,4	246,9	2,6	235,9	13,6
5	258,4	259,6	1,2	259,4	1,0	255,5	2,9	253,3	5,1	253,6	4,8	246,1	12,3
10	261,7	261,7	0,0	261,7	0,0	261,7	0,0	258,1	3,6	258,3	3,4	256,8	4,9
20	266,7	265,8	0,9	265,9	0,8	267,8	1,1	264,7	2,0	264,8	1,9	266,8	0,1
30	270,1	270,0	0,1	270,1	0,0	270,1	0,0	270,0	0,1	270,1	0,0	270,1	0,0
40	275,1	274,5	0,6	274,5	0,6	273,9	1,2	274,8	0,3	274,9	0,2	273,9	1,2
50	279,5	279,5	0,0	279,5	0,0	279,5	0,0	279,5	0,0	279,5	0,0	279,5	0,0
60	283,9	285,4	1,5	285,2	1,3	285,0	1,1	284,3	0,4	284,3	0,4	285,3	1,4
70	289,5	292,5	3,0	292,1	2,6	288,9	0,6	289,5	0,0	289,5	0,0	289,5	0,0
80	297,3	302,1	4,8	301,3	4,0	291,8	5,5	295,7	1,6	295,7	1,6	291,2	6,1
90	307,3	317,5	10,2	316,0	8,7	302,1	5,2	304,4	2,9	304,5	2,8	303,7	3,6
95	316,7	332,1	15,4	329,8	13,1	312,7	4,0	311,7	5,0	311,2	5,5	314,9	1,8
98	323,1	359,8	36,7	347,0	23,9	320,4	2,7	325,3	2,2	320,1	3,0	322,9	0,2
Среднее отклонение:			6,46		4,91		1,92		2,43		2,02		3,48

На рисунке 4 представлены результаты прогнозирования поведения кривой разгонки фракции 240...340 °С модифицированным методом Риизи (табл. 1 набор данных Б).

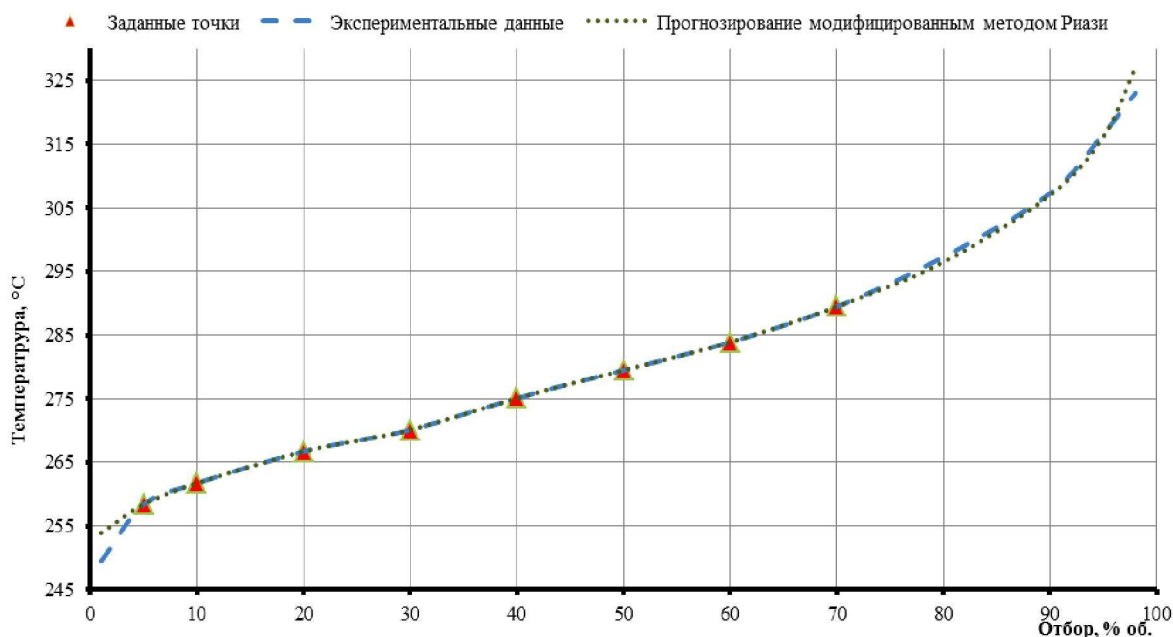


Рис. 4. Прогнозирование поведения кривой разгонки модифицированным методом Риизи

Из рисунка 4 видно, что предлагаемые авторами изменения позволяют увеличить точность получаемых расчетных данных по сравнению с оригинальным методом как между экспериментальными точками, так и за их пределами.

Принимая во внимание то, что для проведения расчетов по предлагаемой методике требуется выполнение большого количества вычислительных операций, она была включена в программу «Nafta», разрабатываемую авторами. Данная программа позволяет производить различные варианты расчётов фазового равновесия пар – жидкость на основании уравнений состояния Пенга – Робинсона и Соава – Редлиха – Квонга, теплофизических свойств, таких как энтальпия пара и жидкости, изохорная и изобарная теплоёмкость, плотность пара и жидкости, имеет базу данных по теплофизическим свойствам для более чем 1600 индивидуальных компонентов, позволяет задавать нефти и их фракции как псевдокомпонентами, так и с помощью разгонок, полученных различными методами.

В таблице 1 представлены результаты прогнозирования кривой разгонки дизельной фракции 240...340 °С по ASTM-D 86 оригинальным методом Риизи, методом авторов (программа «Nafta») и программой PRO/II v.8.3.3.

Для прогнозирования поведения кривой разгонки были использованы различные количества экспериментальных точек (наборы данных, используемые точки указаны в скобках рядом с названием набора).

Из представленных в таблице 1 данных видно:

- предлагаемый авторами метод прогнозирования поведения кривой разгонки нефти и её фракций позволяет получать расчетные данные с более высокой точностью, чем оригинальный метод Риизи;
- полученная кривая разгонки проходит через все заданные экспериментальные точки, что увеличивает точность проведения интерполяции;
- использование ближайших точек для определения начальной температуры кипения, а не всего набора данных позволило увеличить точность прогнозирования поведения кривой разгонки в области начала кипения по сравнению с оригинальной методикой;
- точность полученных данных соизмерима с точностью фирменных алгоритмов, применяемых в программе PRO/II v.8.3.3.

Для оценки стабильности получаемых результатов по предлагаемой методике были произведены расчеты по прогнозированию кривой разгонки различных нефтей и фракций, получаемых из них.

В таблице 2 представлены результаты расчета прогнозирования поведения кривых разгонок для двух проб нефти и фракций, полученных из них. Первая проба нефти имеет плотность 825 кг/м³ при 20 °С, вторая 890 кг/м³ при 20 °С.

Таблица 2

Прогнозирование поведения кривых разгонок нефтей и их фракций

Нефть проба 1 (ASTM D5307)								Фракция 100...150 °С нефть проба 1 (ASTM D86)							
Экспериментальные данные		Набор данных А (10, 30, 50, 70, 90 %)		Набор данных Б (20, 40, 60, 80 %)		Набор данных В (5, 10, 20, 80, 90, 95 %)		Экспериментальные данные		Набор данных А (10, 30, 50, 70, 90 %)		Набор данных Б (20, 40, 60, 80 %)		Набор данных В (5, 10, 20, 80, 90, 95 %)	
Отбор % об.	Температура выкипания, °С	Т, °С	откл.	Т, °С	откл.	Т, °С	откл.	Отбор % об.	Температура выкипания, °С	Т, °С	откл.	Т, °С	откл.	Т, °С	откл.
5	68,8	69,0	0,2	65,0	3,8	68,8	0,0	5	114,8	114,3	0,5	114,3	0,5	114,8	0,0
10	91,0	91,0	0,0	87,1	3,9	91,0	0,0	10	116,1	116,1	0,0	116,1	0,0	116,1	0,0
20	124,7	125,0	0,3	124,7	0,0	125,0	0,3	20	119,0	118,9	0,1	119,0	0,0	119,0	0,0
30	155,7	155,7	0,0	158,3	2,6	158,5	2,8	30	121,2	121,2	0,0	121,3	0,1	121,3	0,1
40	191,8	192,2	0,4	191,8	0,0	192,7	0,9	40	123,6	123,6	0,0	123,6	0,0	123,6	0,0
50	231,6	231,6	0,0	229,5	2,1	229,0	2,6	50	126,2	126,2	0,0	126,1	0,1	126,1	0,1
60	271,6	271,7	0,1	271,6	0,0	269,3	2,3	60	129,0	128,9	0,1	129,0	0,0	128,7	0,3
70	318,7	318,7	0,0	318,3	0,4	316,8	1,9	70	132,0	132,0	0,0	131,9	0,1	131,7	0,3
80	377,7	372,2	5,5	377,7	0,0	377,7	0,0	80	135,5	135,4	0,1	135,5	0,0	135,5	0,0
90	452,1	452,1	0,0	468,2	16,1	452,1	0,0	90	140,3	140,3	0,0	140,8	0,5	140,3	0,0
95	506,1	522,7	16,6	549,5	43,4	506,1	0,0	95	144,0	144,5	0,5	145,3	1,3	144,0	0,0
Среднее отклонение:			2,10		6,57		0,98	Среднее отклонение:			0,12		0,24		0,07
Фракция 250...300 °С нефть проба 1 (ASTM D86)								Фракция 402...461 °С нефть проба 1 (ASTM D1160)							
Экспериментальные данные		Набор данных А (10, 30, 50, 70, 90 %)		Набор данных Б (20, 40, 60, 80 %)		Набор данных В (5, 10, 20, 80, 90, 95 %)		Экспериментальные данные		Набор данных А (10, 30, 50, 70, 90 %)		Набор данных Б (20, 40, 60, 80 %)		Набор данных В (5, 10, 20, 80, 90, 95 %)	
Отбор % об.	Температура выкипания, °С	Т, °С	откл.	Т, °С	откл.	Т, °С	откл.	Отбор % об.	Температура выкипания, °С	Т, °С	откл.	Т, °С	откл.	Т, °С	откл.
5	270,2	270,0	0,2	269,3	0,9	270,2	0,0	5	375,0	391,5	16,5	387,1	12,1	375,0	0,0
10	270,6	270,6	0,0	270,0	0,6	270,6	0,0	10	394,7	394,7	0,0	391,0	3,7	394,7	0,0
20	271,3	271,9	0,6	271,3	0,0	271,3	0,0	20	397,9	399,3	1,4	397,9	0,0	397,9	0,0
30	273,3	273,3	0,0	272,6	0,7	272,3	1,0	30	403,7	403,7	0,0	404,9	1,2	408,3	4,6
40	274,0	274,4	0,4	274,0	0,0	273,5	0,5	40	412,4	410,9	1,5	412,4	0,0	417,2	4,8
50	275,7	275,7	0,0	275,7	0,0	275,0	0,7	50	419,6	419,6	0,0	419,7	0,1	425,6	6,0
60	277,7	277,7	0,0	277,7	0,0	276,9	0,8	60	428,0	429,5	1,5	428,0	0,0	434,0	6,0
70	280,2	280,2	0,0	280,0	0,2	279,4	0,8	70	442,2	442,2	0,0	438,8	3,4	442,8	0,6
80	283,1	283,0	0,1	283,1	0,0	283,1	0,0	80	453,0	450,8	2,2	453,0	0,0	453,0	0,0
90	287,4	287,4	0,0	288,0	0,6	287,4	0,0	90	463,3	463,3	0,0	475,5	12,2	463,3	0,0
95	291,2	291,5	0,3	292,8	1,6	291,2	0,0	95	474,6	474,0	0,6	496,5	21,9	474,6	0,0
Среднее отклонение:			0,15		0,42		0,35	Среднее отклонение:			2,15		4,96		2,00

Фракция 20...100 °С нефть проба 2 (ASTM D86)								Фракция 150...200 °С нефть проба 2 (ASTM D86)							
Экспериментальные данные		Набор данных А (10, 30, 50, 90 %)		Набор данных Б (20, 40, 70 %)		Набор данных В (5, 10, 20, 90, 95 %)		Экспериментальные данные		Набор данных А (10, 30, 50, 90 %)		Набор данных Б (20, 40, 70 %)		Набор данных В (5, 10, 20, 90, 95 %)	
Отбор % об.	Температура выкипания, °С	Т, °С	откл.	Т, °С	откл.	Т, °С	откл.	Отбор % об.	Температура выкипания, °С	Т, °С	откл.	Т, °С	откл.	Т, °С	откл.
5	64,1	63,7	0,4	63,4	0,7	64,1	0,0	5	160,5	160,3	0,2	160,3	0,2	160,5	0,0
10	66,2	66,2	0,0	65,6	0,6	66,2	0,0	10	161,8	161,8	0,0	161,8	0,0	161,8	0,0
20	69,4	69,6	0,2	69,4	0,0	69,4	0,0	20	164,3	164,3	0,0	164,3	0,0	164,3	0,0
30	72,6	72,6	0,0	72,6	0,0	72,4	0,2	30	166,7	166,7	0,0	166,6	0,1	164,5	2,2
40	75,9	75,9	0,0	75,9	0,0	75,2	0,7	40	169,0	167,0	2,0	169,0	0,0	168,8	0,2
50	79,4	79,4	0,0	79,2	0,2	78,2	1,2	50	171,4	171,4	0,0	171,5	0,1	171,2	0,2
60	83,0	82,6	0,4	82,8	0,2	81,5	1,5	60	174,4	174,1	0,3	174,3	0,1	173,9	0,5
70	86,9	86,1	0,8	86,9	0,0	85,2	1,7	70	177,5	177,2	0,3	177,5	0,0	177,0	0,5
90	97,0	97,0	0,0	99,7	2,7	97,0	0,0	90	187,3	187,3	0,0	188,0	0,7	187,3	0,0
95	100,9	102,5	1,6	106,5	5,6	100,9	0,0	95	191,5	192,7	1,2	193,7	2,2	191,5	0,0
Среднее отклонение:			0,34		1,00		0,53	Среднее отклонение:			0,40		0,34		0,36
Фракция 300...343 °С нефть проба 2 (ASTM D86)								Фракция 461...510 °С нефть проба 2 (ASTM D1160)							
Экспериментальные данные		Набор данных А (10, 30, 50, 90 %)		Набор данных Б (20, 40, 70 %)		Набор данных В (5, 10, 20, 90, 95 %)		Экспериментальные данные		Набор данных А (10, 30, 50, 90 %)		Набор данных Б (20, 40, 70 %)		Набор данных В (5, 10, 20, 90, 95 %)	
Отбор % об.	Температура выкипания, °С	Т, °С	откл.	Т, °С	откл.	Т, °С	откл.	Отбор % об.	Температура выкипания, °С	Т, °С	откл.	Т, °С	откл.	Т, °С	откл.
5	314,6	314,9	0,3	314,3	0,3	314,6	0,0	5	440,4	439,7	0,7	464,9	24,5	440,4	0,0
10	315,5	315,5	0,0	315,0	0,5	315,5	0,0	10	446,8	446,8	0,0	465,6	18,8	446,8	0,0
20	316,2	316,5	0,3	316,2	0,0	316,2	0,0	20	467,3	458,9	8,4	467,3	0,0	467,3	0,0
30	317,5	317,5	0,0	317,4	0,1	317,3	0,2	30	470,1	470,1	0,0	469,3	0,8	471,5	1,4
40	318,7	318,7	0,0	318,7	0,0	318,5	0,2	40	471,9	471,3	0,6	471,9	0,0	475,1	3,2
50	320,2	320,2	0,0	320,1	0,1	319,9	0,3	50	472,3	472,3	0,0	475,0	2,7	478,4	6,1
60	321,7	321,7	0,0	321,8	0,1	321,4	0,3	60	477,8	476,5	1,3	479,0	1,2	481,6	3,8
70	323,8	323,6	0,2	323,8	0,0	323,4	0,4	70	484,5	481,1	3,4	484,5	0,0	485,0	0,5
90	330,2	330,2	0,0	330,8	0,6	330,2	0,0	90	493,9	493,9	0,0	506,8	12,9	493,9	0,0
95	333,2	334,0	0,8	334,8	1,6	333,2	0,0	95	494,1	499,9	5,8	521,8	27,7	494,1	0,0
Среднее отклонение:			0,16		0,33		0,14	Среднее отклонение:			2,02		8,86		1,50

Заключение. На основании представленных в таблице 2 данных можно утверждать следующее:

- предлагаемый авторами метод прогнозирования позволяет производить расчет кривых разгонки нефти и её фракций, полученных по различным методикам;
- метод дает хорошие результаты как для тяжелых, так и для легких нефтей;
- точность данных, полученных для узких фракций, выше, чем для широких;
- для повышения точности расчетов желательно иметь данные о поведении кривой разгонки в области начала и конца кипения;
- метод позволяет достаточно точно прогнозировать поведение кривой разгонки нефти в независимости от равномерности распределения экспериментальных данных.

Предлагаемый метод может быть полезен:

- для прогнозирования поведения кривой разгонки нефти и её фракций при разработке математической модели новых установок или анализа работы действующих;
- при необходимости проведения интерполяции или экстраполяции уже имеющихся лабораторных данных;
- при предсказании фракционного состава компаундированных топлив, то есть на основании данных о фракционном составе входящих в них компонентов.

Получаемые по предлагаемому методу результаты хорошо соотносятся с экспериментальными данными и не уступают в точности методам, которые используются в общепризнанных зарубежных программных продуктах.

ЛИТЕРАТУРА

1. Григорьев, Б.А. Теплофизические свойства нефти, нефтепродуктов, газовых конденсатов и их фракций / Б.А. Григорьев, Г.Ф. Богатов, А.А. Герасимов; под ред. Б.А. Григорьева. – М.: Изд-во МЭИ, 1999. – 372 с.
2. Riazi, M.R. Characterization and properties of petroleum fractions / M.R. Riazi. – 1 st ed. P. cm. – (ASTM manual series: MNL50).

Поступила 21.06.2012

MODIFICATION OF THE RIAZI'S METHOD FOR PREDICTION OF DISTILLATION CURVES FOR OIL AND PETROLEUM FRACTIONS

S. DEMCHENKO, S. TKACHEV

The analysis of modern methods for prediction of distillation curves for oil and petroleum fractions is carried out. Modification variant of Riazi's method is offered. The offered modification variant provides increase of accuracy of prediction of the initial boiling point and the final boiling point and also intermediate points in the whole boiling range. Algorithms and calculation program are developed. The comparative analysis of results of prediction of distillation curves for various crude oils and petroleum fractions, received with using of discussed methods, including techniques, used in avowed foreign software products, is made.

УДК 613.62

АНАЛИЗ ЗАБОЛЕВАЕМОСТИ С ВРЕМЕННОЙ УТРАТОЙ ТРУДОСПОСОБНОСТИ РАБОЧИХ НЕФТЕХИМИЧЕСКОГО ПРЕДПРИЯТИЯ

**ЮСРА МОХАММЕД КВИДЖА АЛЬ-ДАЛЕМИ, д-р мед. наук, доц. П.А. ЧЕБОТАРЕВ,
канд. техн. наук, доц. В.Б. ХАЛИЛ
(Полоцкий государственный университет)**

Представлен анализ заболеваемости с временной утратой трудоспособности рабочих нефтехимического предприятия. Показана структура временной и частотной динамики профессиональной заболеваемости работников в производстве мономеров завода «Полимир» ОАО «Нафтан»: акрилонитрила, ацетонитрила, ацетонциангидрина, метилакрилата. Продемонстрированы основные нозологические группы заболеваний, отдельно рассмотрена структура заболеваемости вне и в рамках конкретной нозологической группы, с учетом динамики численности и состава рабочих исследуемого цеха.

Введение. В современной отраслевой структуре народного хозяйства Республики Беларусь главная роль принадлежит обрабатывающей промышленности, приносящей государству 50 % национального годового дохода [1]. Химическая и нефтехимическая отрасли являются ее базовыми компонентами и занимают срединное положение в отраслевой структуре – 4-е из 8-ми [1]. В результате комплексного воздействия химического и физического вредных производственных факторов, а также неблагоприятных условий на рабочих местах [2 – 7] у работников нефтехимических производств формируются профессиональные, производственно обусловленные заболевания [2 – 9]. При этом наиболее вредным для здоровья работников является химический производственный фактор [2 – 9].

Продукция нефтехимической промышленности используется в основном в производстве мономеров для органического синтеза; в производстве полимерных пластмасс и изделий из них, синтетического каучука, пластмасс и синтетических смол, резинотехнических изделий, химических средств защиты растений и других агрохимических продуктов, синтетических и искусственных волокон и др. [2; 4].

Цель данной работы – проанализировать структуру и динамику заболеваемости с временной утратой трудоспособности (ЗВУТ) работников нефтехимической промышленности, занятых в производстве мономеров.

Постановка задачи. Производство мономеров для органического синтеза включает в себя выпуск дивинила, изопрена, ацетонитрила, акрилонитрила, ацетонциангидрина, метилакрилата, метилметакрилата, диметилдихлорсилана, циклоолефинов, этилена, винилхлорида и многих других веществ [10]. Следует, однако, оговориться, что понятие «производство мономеров», используемое в данной статье, является условным.

Многие ученые в своих работах сообщают, что в большинстве случаев на предприятиях по выпуску мономеров и на нефтехимических предприятиях в целом заболевания с временной утратой трудоспособности включают в себя следующие нозологические группы: органов дыхания, крови и кроветворных органов, системы кровообращения, органов пищеварения, костно-мышечной системы, кожи, нервной системы, мочевыделительной и половой систем, глаза, уха и сосцевидного отростка, психические расстройства [2 – 9]. Частотные соотношения для указанных нозологических форм заболеваний зависят от конкретного типа производства (воздействующего вещества), а потому колеблются в различных исследованиях. В [2; 8; 9] был сделан вывод о нелинейной зависимости структуры и количества профессиональных заболеваний сотрудников нефтехимических производств от времени. Кроме этого, указывается на общетоксическое и раздражающее действие химических веществ, использующихся в производстве мономеров [4].

Для анализа динамики и структуры производственно обусловленных заболеваний, в целом характерных для производства мономеров в нефтехимической отрасли, исследовалась заболеваемость работников цеха по производству мономеров завода «Полимир» ОАО «Нафтан» (г. Новополоцк, Республика Беларусь).

Из указанного выше перечня химических веществ-мономеров для органического синтеза заводом «Полимир» ОАО «Нафтан» выпускаются акрилонитрил, ацетонитрил, ацетонциангидрин, метилакрилат.

Исследование осуществлялось путем анализа статистических данных годовых отчетов о временной нетрудоспособности работников цеха по выпуску мономеров завода «Полимир» ОАО «Нафтан» за период с 01.01.2003 по 31.12.2011; учитывалось общее количество заболеваний, число работников и соотношение мужчин и женщин в коллективе, количество нозологических групп заболеваний, частота возникновения зарегистрированных заболеваний вне и в рамках конкретной нозологической группы, динамика описанных показателей во временном разрезе.

Анализ заболеваемости работников завода «Полимир» ОАО «Нафтан», занятых в производстве мономеров. Исследование данных годовых отчетов о временной нетрудоспособности работников цеха по выпуску мономеров показало, что зарегистрированные за указанный выше период заболевания,

сопровождающиеся временной нетрудоспособностью заболевших работников, относятся к следующим нозологическим группам заболеваний: органов дыхания, костно-мышечной системы, мочеполовой системы, органов пищеварения, кожи и подкожной клетчатки, системы кровообращения и сердечнососудистой системы (ССС), глаз и уха и сосцевидного отростка, нервной системы, крови и кроветворных органов, эндокринной системы, инфекционные и паразитарные заболевания, травмы и отравления, новообразования, психические расстройства, нарушения репродуктивной функции у женщин.

Динамика численности и доли женщин среди работников производства мономеров завода «Полимир» ОАО «Нафтан» приведена в таблице 1. Усредненные данные за рассматриваемый период в рамках отдельных нозологических групп – в таблице 2.

Таблица 1

Изменения численности и состава работников завода «Полимир» ОАО «Нафтан», занятых в производстве мономеров

Исследуемый период, год	Общее число работников	Число женщин в коллективе
2003	512	75
2004	526	57
2005	513	53
2006	539	52
2007	543	46
2008	544	45
2009	543	43
2010	539	39
2011	438	30

Из таблицы 1 видно, что имеет место тенденция к снижению как общего количества работников (с 2010 г.) в рассматриваемом производстве, так и доли в нем женщин.

Таблица 2

Заболеваемость с ВУТ работников завода «Полимир» ОАО «Нафтан», занятых в производстве мономеров, за период с 01.01.2003 по 31.05.2012

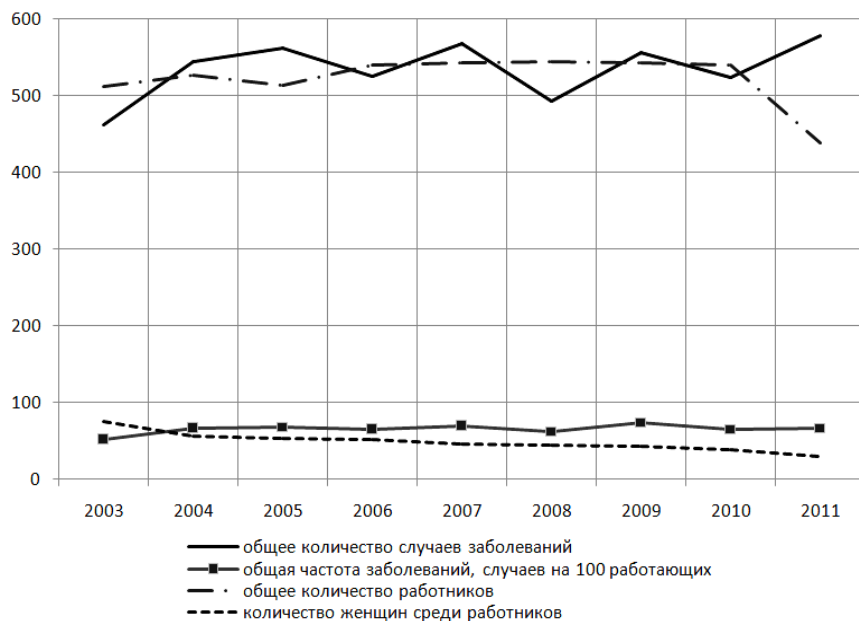
Нозологическая группа	Среднее число случаев заболеваемости в год	Среднее число случаев заболеваемости на 100 рабочих в год
Заболевания органов дыхания	287,67	34,29
Болезни костно-мышечной системы	73,77	8,85
Отравления и травмы на рабочем месте	70,33	8,41
Болезни системы кровообращения и СССР	25,11	3,00
Болезни органов пищеварения	20,22	2,41
Болезни мочеполовой системы	12	1,93
Заболевания кожи и подкожной клетчатки	14	1,66
Болезни глаза и придатков, уха и сосцевидного отростка	13,22	1,38
Новообразования	6,22	0,74
Инфекционные и паразитарные заболевания	3,78	0,45
Психические заболевания и расстройства	3,22	0,38
Заболевания нервной системы	2,22	0,26
Заболевания эндокринной системы	1	0,12
Заболевания крови и кроветворных органов	0,33	0,04
Нарушение репродуктивной функции у женщин	1,50	1,96

Анализ данных, приведенных в таблице 2, показал: чаще всего работники обращались за медицинской помощью в связи с заболеваниями органов дыхания; на втором месте – болезни костно-мышечной системы; на третьем – отравления и травмы на рабочем месте; далее в рейтинг-листе располагаются болезни системы кровообращения и сердечнососудистой системы, органов пищеварения, заболевания кожи и подкожной клетчатки, болезни глаза и придатков, уха и сосцевидного отростка, мочеполовой системы, выявленные новообразования, инфекционные и паразитарные заболевания; затем – психические заболевания и расстройства, патологии нервной системы, нарушение репродуктивной функции у женщин, нарушения функционирования эндокринной системы; замыкают список заболевания крови и кроветворных органов.

В целом общее количество случаев ЗВУТ на исследуемом производстве за период с 2003 по 2011 год изменяется нелинейно; с 2003 по 2005 год среди работников наблюдается устойчивый рост заболеваемо-

сти, далее показатели изменяются с периодичностью в два года: рост показателей заболеваемости регистрировался в 2007, 2009, 2011 годах, спад – в 2006, 2008, 2010 годах. Данный факт может быть объяснен наращиванием производственных мощностей завода и участка по производству мономеров, с одной стороны, и проведением интенсивных профилактических мер, более тщательным соблюдением регламента по технике безопасности, улучшением условий труда работников и микроклимата в производственных помещениях – с другой.

Общая динамика количества и частоты производственно обусловленных заболеваний на участке по выпуску мономеров завода «Полимир» ОАО «Нафтан» показана на рисунке.



Динамика заболеваемости с временной утратой трудоспособности и численности работников завода «Полимир» ОАО «Нафтан», занятых в производстве мономеров за период с 01.01.2003 по 31.05.2012

Результаты исследования, представленные на рисунке, свидетельствуют, что за изученный период уровень заболеваемости практически не изменялся.

Целесообразно рассмотреть структуру и динамику заболеваний нескольких основных нозологических групп по отдельности.

Болезни органов дыхания представлены гриппом, пневмонией, острыми респираторными инфекциями, хроническим бронхитом, бронхиальной астмой, другими болезнями верхних дыхательных путей. Чаще всего регистрируются острые респираторные инфекции (ОРИ, в среднем, 257,6 случаев в год), грипп (21,56 случаев в год), другие болезни верхних дыхательных путей (3 случая). Реже фиксируется пневмония (2,33 случая), бронхиальная астма и хронический бронхит. Частота выявления последних двух заболеваний не превышает 1 и 1,75 случаев в год.

Заболевания костно-мышечной системы (КМС) включают в себя атропатии и системные поражения, неврологические проявления нарушений функционирования шейного и поясничного отделов позвоночника, а также другие заболевания. Чаще других регистрировались неврологические проявления нарушений функционирования поясничного отдела позвоночника. В среднем болезни костно-мышечной системы отмечались у 8-ми работников из 100, абсолютные частоты изменялись от 5,73 на 100 работников в 2003 году до 6,86 в 2011 году с максимумом в 2005 году (11,66 заболевших на 100 работающих). Зависимость частоты выявления заболеваемости от времени также носила нелинейный характер с постепенным снижением за последние 2 года.

Отравления и травмы на рассматриваемом производстве возможно отнести не к профессиональным, а скорее к производственно обусловленным заболеваниям. В данной нозологической группе преобладали изолированные переломы верхних и нижних конечностей (более 35 % всех случаев), изолированные травмы мягких тканей (30 %), вывихи (10 %), далее располагались множественные и комбинированные травмы, внутричерепные травмы, ожоги и отморожения и другие воздействия, реже всего происходили отравления и токсические воздействия. В целом за период с 2003 по 2011 год динамика отравлений

и травм в производстве мономеров на заводе «Полимир» ОАО «Нафтан» была нелинейной, однако с 2009 года наблюдается постепенное снижение как общего количества зарегистрированных случаев, так и частоты их выявления на 100 работающих с 71 и 8,59 до 66 и 7,73 соответственно.

Среди болезней *систем кровообращения и сердечнососудистой системы* преобладали заболевания, связанные с повышенным артериальным давлением (до 25 % всех случаев), болезни вен и лимфатических сосудов (до 20 %), стенокардия (до 15 % всех случаев), далее в списке шли инфаркт миокарда и другие формы инфаркта, хроническая ишемическая болезнь сердца (ИБС). Достаточно редко, но все же регистрировались мозговые инсульты (в среднем 0,77 случаев на 100 работающих в год), заболевания артерий, артериол и капилляров (в среднем 0,67 случаев на 100 сотрудников за год), прочие цереброваскулярные заболевания. Как общее количество заболеваний СКО и ССС, так и их частота нелинейно зависят от времени и численности работников, в последние 2 года наблюдается постепенное снижение данных показателей.

Болезни органов пищеварения были представлены следующими заболеваниями: болезни полости рта и слюнных желез (приблизительно 25 % всех случаев), язвенная болезнь желудка и 12-перстной кишки (20 %), гастриты и дуодениты (8 %), болезни аппендикса и грыжи (12 %), болезни печени (4 %) и желчного пузыря (3 %) и др. В рамках группы заболеваний органов пищеварения наблюдается периодичность роста и уменьшения количества и частоты зарегистрированных случаев за рассматриваемый период, совпадающая с аналогичной для количества случаев заболеваемости с ВУТ по производству в целом.

Болезни мочеполовой системы были представлены заболеваниями почек, другими заболеваниями мочеполовой системы, воспалительными заболеваниями, заболеваниями женских половых органов. Чаще других встречаются заболевания почек (от 10 до 30 % всех зарегистрированных случаев в зависимости от года). Исследования показали, что для заболеваний мочеполовой сферы характерен рост частоты заболеваний в пересчете на 100 работающих за рассматриваемый период с 1,45 до 2,73 случаев, при общей нелинейной динамике с наметившимся снижением количества заболеваний с 2010 года.

Нарушение репродуктивной функции у женщин, занятых в производстве мономеров на заводе «Полимир» ОАО «Нафтан», выражалось в выявлении осложнений при протекании беременности (от 80 до 90 %) и в послеродовом периоде, наблюдались также прерывания беременности, вызванные воспалительными или же другими заболеваниями женских половых органов. На 100 женщин приходилось в среднем 1,25 случаев беременности за отчетный период. При этом в 2003 году, а также с 2006 по 2008 год беременности у работниц не фиксировались. В 2009 году было зафиксировано 5 беременностей. Только в одном из отмеченных случаев беременности не возникло осложнений во время ее протекания. Однако в этом случае наблюдались осложнения в послеродовом периоде. Тем не менее в связи с осложнениями при протекании беременностей у работниц не производились аборт или же искусственные роды, что позволяет сделать вывод о высокой эффективности лечения возникших осложнений.

Заболевания кожи и подкожной клетчатки наблюдались в среднем у 1 – 2-х работников из 100. В основном данную нозологическую группу представляли инфекционные заболевания кожи и подкожной клетчатки (50...54 % от всех случаев), аллергические реакции на вещества, участвующие в синтезе мономеров, прочие заболевания кожи и подкожной клетчатки. Зависимость распространенности кожных патологий среди работников производства мономеров на заводе «Полимир» ОАО «Нафтан», как и в случае других нозологических групп, нелинейна. Наибольший уровень данной группы заболеваний наблюдался в 2011 году (3,41 случаев на 100 работающих), наименьший уровень – в 2003 году (1,01 случаев на 100 работающих).

Динамика *болезней глаза и придатков*, а также заболеваний уха и сосцевидного отростка в целом совпадает с динамикой кожных заболеваний. Наибольшее количество случаев зарегистрировано в 2011 году – 1,38 и 1,1 случаев на 100 работающих соответственно. Наименьшее – в 2003 году (по 0,9 случаев на 100 работающих для обеих групп болезней). Преобладают заболевания глаза и его придатков.

Количество выявленных у работников производства мономеров на заводе «Полимир» ОАО «Нафтан» *новообразований* за рассматриваемый отчетный период изменялось нелинейно, больше всего случаев было зарегистрировано в 2009 году (12 случаев всего, 1,45 случаев на 100 работающих). В структуре выявляемых новообразований преобладают доброкачественные, они составляют от 50 до 90 % всех зарегистрированных новообразований. Количество выявляемых злокачественных образований за отчетный период меняется незначительно и составляет 1 – 2 в год, исключением является 2003 год, в котором было обнаружено 5 злокачественных и 2 доброкачественных новообразований.

Инфекционные и паразитарные заболевания у работников завода «Полимир» ОАО «Нафтан», занятых в производстве мономеров, обнаруживаются в среднем от 3 до 5 случаев в год за отчетный период. Максимальное количество было зарегистрировано в 2011 и 2009 годах (6 и 5 случаев соответственно). В состав данной нозологической группы входят туберкулез органов дыхания и другие инфекционные и паразитарные заболевания, последние преобладают. Туберкулез органов дыхания встречается в среднем

1 раз в три года, в то время как иные инфекционные заболевания регистрируются каждый год, их количество практически не зависит от численности работников, во времени изменяется нелинейно. В целом клиническая картина по инфекционным и паразитарным заболеваниям на исследуемом производстве достаточно благоприятна.

Психические заболевания и расстройства, обнаруженные у работников исследуемого производства за период с 2003 по 2011 год, включают нейроциркулярные вегетативные и прочие психические расстройства, невротические расстройства, шизофрению. Шизофрения у работников производства мономеров выявлялась всего один раз за указанный период – в 2006 году было зарегистрировано 3 случая данного заболевания. В целом в данной нозологической группе преобладают нейроциркулярные вегетативные (до 40 % всех случаев) и невротические (до 40 % всех случаев) расстройства. Для данной нозологической группы характерен переменный рост до 2008 года и устойчивый спад общего количества заболеваний и их частоты после 2008 года вплоть до конца рассматриваемого периода. Клиническая картина по данной группе заболеваний начиная с 2008 года также достаточно благоприятна.

Заболевания нервной системы, обнаруженные у рассмотренной категории работников, были представлены в основном заболеваниями периферической нервной системы, динамика которых, как и в большинстве описанных ранее нозологических групп, нелинейна и несколько неустойчива. В последнее время наблюдается незначительное уменьшение количества выявленных у работников рассмотренного производства мономеров заболеваний периферической нервной системы. В среднем за год фиксируется 2,22 случаев данной группы заболеваний, при этом их частота составляет 0,264 случаев на 100 работающих.

Заболевания эндокринной и кроветворной систем являются самыми редкими для рассмотренной категории работников завода «Полимир» ОАО «Нафтан». Их частота в среднем составляет 0,119 случаев на 100 работающих и 0,04 случаев на 100 работающих соответственно. При этом общее количество случаев также больше для эндокринной системы. Количество случаев заболеваний кроветворной системы не превышает 1 за три года и за рассмотренный период практически не изменяется, эндокринной – 0,9 случаев в год, после небольшого всплеска в 2004 – 2005 годах выровнялось и также практически не меняется до конца рассматриваемого периода.

Следует отметить, что в литературе по оценке распространенности профессиональных заболеваний в нефтехимической промышленности в целом и в производстве мономеров для органического синтеза в частности имеются сведения о том, что эндокринная и кроветворная системы работников более подвержены влиянию химического вредного производственного фактора. Данное расхождение может быть объяснено зависимостью протекания профессиональных и производственно обусловленных заболеваний от типа конкретного производства.

Заключение. По результатам работы были сделаны следующие *выводы*:

- структура заболеваний, характерных для производства мономеров, имеющаяся в литературе, в целом совпадает с установленной в рамках данной работы. Однако в литературных источниках в основном ограничиваются восемью нозологическими группами – заболевания органов дыхания, органов пищеварения, костно-мышечной системы, сердечнососудистой системы и системы кровообращения, болезни кожи и подкожной клетчатки, кроветворной системы, болезни мочевыделительной и половой систем, болезни нервной системы. В данной работе также выявлено наличие у работников производства мономеров таких нозологических групп, как травмы и отравления, болезни глаз и придатков, болезни уха и соседнего отростка, инфекционные и паразитарные заболевания, психические расстройства, новообразования, заболевания эндокринной системы;

- чаще всего регистрируются заболевания органов дыхания, костно-мышечной системы, отравления и травмы, болезни системы кровообращения и сердечнососудистой системы, болезни органов пищеварения;

- в большинстве описанных нозологических групп временная и частотная динамика нелинейны и неустойчивы, рост и спад общего количества заболеваний характеризуются периодичностью в два года, начиная с 2010 года наблюдается некоторое снижение общего количества заболеваемости в пересчете на 100 работающих, исключение составляют заболевания мочеполовой системы, частота выявления которых возросла на фоне уменьшения численности работающих. Подобную динамику количества и частоты выявления заболеваний, сопровождающихся ВУТ у работников завода «Полимир» ОАО «Нафтан», занятых в производстве мономеров, возможно объяснить наращиванием производственных мощностей завода и участка по производству мономеров, внедрением в производство и соблюдением требований современной системы управления охраной труда (СУОТ) с 2007 года.

ЛИТЕРАТУРА

1. Промышленность Республики Беларусь: стат. сб. / И.С. Кангро [и др.]. – Минск, 2011. – 273 с.

2. Гизатуллина, Д.Ф. Условия труда и состояние здоровья ремонтных рабочих современных нефтехимических производств: дис. ... канд. мед. наук / Д.Ф. Гизатуллина. – М., 2010. – 192 с.
3. Кирсанов, В.В. Совершенствование системы производственной безопасности на предприятиях нефтехимического комплекса: автореф. ... канд. техн. наук / В.В. Кирсанов. – Казань, 1999. – 28 с.
4. Зотова, Т.М. Оценка и управление профессиональными рисками нарушения здоровья работающих в производствах органического синтеза: автореф. ... канд. техн. наук / Т.М. Зотова. – М., 2008. – 24 с.
5. Волгарева, А.Д. Условия формирования, ранняя диагностика и профилактика профессиональных нарушений органа слуха у работников нефтедобывающей и нефтехимической промышленности: автореф. ... канд. мед. наук / А.Д. Волгарева. – М., 2005. – 25 с.
6. Факторы риска в производствах органического синтеза / Л.К. Каримова [и др.] // Бюл. ВСЦН СО РАМН. – 2009. – № 1(65). – С. 34 – 38.
7. Профессиональная и производственно-обусловленная патология у работающих в современных нефтехимических производствах / Э.Т. Валеева [и др.] // Агроэкологическая безопасность в условиях техногенеза: сб. науч. докл. междунар. симпоз., г. Казань, 21 – 23 июня 2006 г. – Казань, 2006. – С. 121 – 126.
8. Факторы риска и особенности формирования профессиональной заболеваемости у работающих в нефтехимической промышленности: пособие для врачей / Э.Т. Валеева [и др.]. – Уфа: ФГУН УфНИИ МТ ЭЧ Роспотребнадзора, 2008. – 64 с.
9. Гигиена труда, профпатология и токсикология в ведущих отраслях народного хозяйства: сб. ст. / МЗ Каз. ССР. НИИ краев. патологии. Алма-Атин. гос. мед. ин-т; отв. ред. В.А. Козловский. – Алма-Ата: НИИ краев. патологии, 1988. – 202 с.
10. Платэ, Н.А. Основы химии и технологии мономеров: учеб. пособие / Н.А. Платэ, Е.В. Сливинский. – М.: Наука: МАИК «Наука/Интерпериодика», 2002. – 696 с.

Поступила 25.07.2012

THE ANALYSIS OF SICKNESS RATE WITH TEMPORARY LOSS OF THE ABILITY TO WORK OF THE PETROCHEMICAL ENTERPRISE WORKERS

*JUSRA MOKHAMMED KVIDJA AL-DALEMI,
P. TCHEBOTARYOV, V. KHALIL*

The analysis of sickness rate with temporary loss of the ability to work of the petrochemical enterprise workers is presented. The structure of temporal and frequency dynamics of professional sickness rate of the monomer (such as acrylonitrile, acetonitrile, acetone cyanohydrin, methyl acrylate) production workers of the plant "Polymir" JSC "Naftan" is shown. The basic nosologic groups of illnesses are presented, the structure of sickness rate within and beyond a certain nosologic group is observed separately taking into account the dynamics of the number and membership of the workers of the department under study.

СОДЕРЖАНИЕ

МАШИНОСТРОЕНИЕ

<i>Данилов В.А., Киселев Р.А., Крутько В.С.</i> Особенности построения формообразующих систем технологического оборудования модульного типа для раскроя материалов энергетическим лучом.....	2
<i>Попок Н.Н.</i> Анализ тенденций проектирования инструментальных систем. Часть 2. Механизмы крепления модулей.....	11
<i>Кастрюк А.П., Иванов В.П.</i> Модульные процессы восстановления деталей в ремонтном производстве	20
<i>Седель О.Я.</i> Синтез дифференциальных механизмов регулирования технологического процесса на станках	24
<i>Краснер С.Ю., Сункуев Б.С.</i> Методика проектирования механизма автоматической обрезки ниток многоголовочного вышивального полуавтомата с МПУ	31
<i>Турицев Л.С.</i> Об оптимальном проектировании шарнирно-стержневых систем	39
<i>Адамович А.Л., Грозберг Ю.Г., Мателенок Ю.В., Кизина О.А., Бульбенкова Т.А.</i> Излучатель для лучевой камеры СВЧ-нагрева и сушки материалов	42
<i>Воробей А.М., Рымарев Д.В., Давыдов М.В., Стебунов С.С.</i> Моделирование емкостного датчика влажности кожи.....	50
<i>Дробышевская О.В., Колесникович А.Н., Матушкина О.В.</i> Расчетное определение инерционных свойств автомобиля для моделирования динамики движения в задачах управляемости и устойчивости	56
<i>Иванов В.П., Мозалевский Д.В., Артюшевская Н.В.</i> Вопросы планировочного развития и транспортные проблемы города Полоцка.....	62
<i>Капский Д.В.</i> Прогнозирование аварийности по потенциальной опасности: направления совершенствования.....	67

МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ

<i>Алифанов А.В., Попова Ж.А., Демянчик А.С.</i> Влияние режимов упрочняющей магнитно-импульсной обработки на прочностные характеристики дереворежущих ножей	74
<i>Кастрюк А.П., Вигерина Т.В., Штемпель О.П., Фруцкий В.А.</i> Композиционный порошковый материал для восстановления или упрочнения деталей двигателей внутреннего сгорания.....	79
<i>Алексеев Ю.Г., Исаевич Л.А., Королёв А.Ю., Нисс В.С.</i> Влияние электролитно-плазменной обработки в процессе деформационного упрочнения волочением на прочностные характеристики стали 12Х18Н9	85
<i>Долгих А.М.</i> Повышение стойкости сверл из быстрорежущей стали низкотемпературной нитроцементацией	91
<i>Янушонок А.Н., Снарский А.С.</i> Способ повышения надежности кольцевых сварных соединений магистральных трубопроводов при длительной эксплуатации	95

ХИМИЧЕСКАЯ ТЕХНОЛОГИЯ

<i>Покровская С.В., Булавка Ю.А., Богданович А.И., Зубова А.В.</i> Применение регенерированного отработанного моторного масла и органического отгона шлама в производстве мыльных и углеводородных пластичных смазок.....	104
<i>Абаев Г.Н., Андреева Р.А., Шевченко Л.П.</i> Обобщение данных по кинетике метаногенеза отходов очистных сооружений	109
<i>Ермак А.А., Михайловский Е.В., Мандрика И.А.</i> Влияние продукта взаимодействия рапсового масла с диэтилентриамином на свойства дорожного битума	117
<i>Булавка Ю.А., Смиловенко О.О., Коваленко П.В., Сташевич Е.В.</i> Апостериорная оценка состояния аварийности на нефтеперерабатывающем предприятии	122
<i>Юсра Мохаммед Квиджа Аль-Далеми, Чеботарев П.А., Халил В.Б.</i> Анализ состояния здоровья рабочих нефтехимических предприятий по производству полиэтилена.....	129
<i>Демченко С.С., Ткачев С.М.</i> Модификация метода Риози для прогнозирования кривых разгонки нефти и нефтяных фракций.....	135
<i>Юсра Мохаммед Квиджа Аль-Далеми, Чеботарев П.А., Халил В.Б.</i> Анализ заболеваемости с временной утратой трудоспособности рабочих нефтехимического предприятия	144