НАУЧНЫЙ ЦЕНТР «АЭТЕРНА»

АКТУАЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ ТЕХНИЧЕСКИХ НАУК: ТЕОРЕТИЧЕСКИЙ И ПРАКТИЧЕСКИЙ АСПЕКТЫ

КОЛЛЕКТИВНАЯ МОНОГРАФИЯ

Уфа
АЭТЕРНА
2014

УДК 00(082)
ББК 65.26
А 38

Рецензенты:
1. Прошин И.А., д.т.н., проф.
2. Шлахов С.М., д.ф-м.н., проф.

А 38 Актуальные вопросы технических наук: теоретический и практический аспекты: коллективная монография [под ред. И.А. Григорьева] . - Уфа: Аэтерна, 2014. – 172 с.

ISBN 978-5-906769-98-5

Коллективная монография «Актуальные вопросы технических наук: теоретический и практический аспекты» посвящена широкому кругу проблем, которые находятся в центре внимания. Монография призвана дать представление о актуальных теоретических и практических вопросах технических наук.

Ответственность за аутентичность и точность цитат, имен, названий и иных сведений, а так же за соблюдение законов об интеллектуальной собственности несут авторы публикуемых материалов. Материалы публикуются в авторской редакции.

УДК 00(082)
ББК 65.26

ISBN 978-5-906769-98-5

© ООО «Аэтерна», 2014
©Коллектив авторов,2014

УДК 62

А.Н. Земцов
кандидат технических наук, доцент кафедры «ЭВМ и системы»
Волгоградский государственный технический университет
г. Волгоград, Российская Федерация

ОЦЕНКА ЭФФЕКТИВНОСТИ АЛГОРИТМОВ МАРКИРОВАНИЯ ЦИФРОВЫХ ИЗОБРАЖЕНИЙ В ЧАСТОТНОЙ ОБЛАСТИ НА ОСНОВЕ ДИСКРЕТНОГО ВЕЙВЛЕТ-ПРЕОБРАЗОВАНИЯ

В современных системах электронного документооборота информация всегда представляется в сжатом виде, но чем более совершенными становятся методы сжатия, тем меньше остается возможностей для встраивания посторонней информации [1]. Стеганография является очень молодой наукой и в настоящее время находится на этапе своего формирования. Развитие теории и практики алгоритмов сжатия мультимедийной информации привело к изменению представлений о технике внедрения информации с помощью стеганографических методов.

Сегодня серьезным сдерживающим фактором на пути перехода к электронным документам является нерешенность ряда серьезных вопросов, связанных с обеспечением безопасности информации в системах электронного документооборота. В частности, переход к электронным документам предполагает их хранение и передачу в электронном виде по различным каналам связи.

Самым очевидным применением техники водяных знаков является защита авторских прав [2], а главным примером являются банкноты и различные документы, которые изготавливаются из гербовой бумаги, то есть бумаги с нанесенными на нее изображениями.

Следствием этого применения водяных знаков является выявление подделок. Например, в настоящее время очень часто в качестве различных доказательств выступают цифровые фотографии, то встает вопрос о проверке их подлинности. С помощью различных приложений можно легко подделать снимки, ретушировать их или добавить что-то на изображение. Применение водяных знаков решает эту проблему в силу того, что любые модификации приводят к разрушению водяного знака, а подлинными будут считаться лишь полные копии изображения.

Другим применением водяных знаков является возможность передачи с помощью них скрытой информации [6], причем это будет незаметно наблюдателю.

Отметим, что в наши дни техника водяных знаков применима к решению очень большого круга задач, связанных с кодированием информации различных форматов. Это может быть и текстовая информация, и графическая

[3], и аудио [8], и даже трехмерные модели [1]. В данном исследовании будет затронута проблема маркировки водяными знаками цифровых изображений. Это ограничение необходимо для упрощения операций встраивания знака. Как нам известно, каждая точка изображения в цветовой модели RGB задается 3 каналами: r, g и b, причем у черно-белого изображения значения для каждого канала равны [4].

Следует отметить, что технике водяных знаков уделено еще недостаточно внимания, существует не так много исследовательских работ, посвященных этой теме. Однако, очевидно, что применение цифровых водяных знаков будет широким.

Маркировка изображений водяными знаками происходит с помощью незаметного внедрения в это изображение некоторой подписи. Обычно это тоже какое-то изображение, представляющее собой логотип компании, или текстовое сообщение, или последовательность псевдослучайных чисел, или даже отпечаток пальца собственника авторских прав [2]. Внедрение водяного знака сопровождается появлением ошибок и искажений. Для обеспечения ясности суммарный вклад этих ошибок и искажений должен быть минимален.

В настоящее время стало очевидно, что традиционный аппарат анализа стационарных сигналов, каким является преобразование Фурье [4], оказывается малоэффективным для представления фрактальных функций и сигналов [5], другими словами, функций с локальными особенностями, например, разрывами, получивших широкое распространение в последние годы.

Одним из основных недостатков преобразования Фурье является использование в качестве базовой функции синусоиды, периодически продолжаемой на R [4]. В условиях ограничения числа членов ряда Фурье или спектра разложения такая функция принципиально не способна описывать нестационарные сигналы [1].

Обозначим через $L^2(0,2\pi)$ множество всех измеримых функций f, определенных на интервале $(0,2\pi)$ и таких, что:

$$\int_0^{2\pi} |f(x)|^2 dx < \infty \quad . \tag{1}$$

Здесь f является периодически продолжаемой на R кусочно-непрерывной функцией, поэтому $L^2(0,2\pi)$ называют 2π-периодической функцией со среднеквадратичной сходимостью. Любую функцию f можно представить рядом Фурье [4]:

$$f(x) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} c_n e^{inx} \quad , \tag{2}$$

где c_n - коэффициенты Фурье, которые определяются как:

$$c_n = \frac{1}{2\pi}\int_0^{2\pi} f(x)e^{-inx}\,dx \quad . \tag{3}$$

Из формулы (2) видно, что для получения преобразования необходимо иметь сведения о поведении сигнала не только в прошлом, но и в будущем.

Любая функция $f \in L^2(0,2\pi)$ порождается суперпозицией целочисленных растяжений базисной функции $\omega(x) = e^{ix} = \cos(x) + i\sin(x)$, которая является синусоидальной волной. Необходимо отметить, что функция $\omega_n(x) = \omega(nx)$ не принадлежит пространству $L^2(R)$, являющемуся одним из случаев гильбертова пространства, для которого:

$$\int_{-\infty}^{\infty} |f(x)|^2\,dx < \infty \quad . \tag{4}$$

Из (4) следует, что любая $f \in L^2(R)$ должна затухать при $x \to \pm\infty$ и $\omega_n(x) \notin L^2(R)$. Таким образом, для использования функций $\omega_n(x)$ для порождения $L^2(R)$ необходимо, чтобы $\omega_n(x)$ затухали до нуля при $x \to \pm\infty$ как, например, базисные функции вейвлетов Мейера [7].

Основная идея вейвлет-анализа заключается в разложении сигнала f по базису функций ψ_i:

$$f = \sum_i c_i \psi_i \quad , \tag{5}$$

т.е. в представлении сигнала f в виде взвешенной суммы базисных функций ψ_i, помноженных на коэффициенты c_i. Из формулы (5) следует, что только коэффициенты c_i содержат информацию о конкретном сигнале f, так как базисные функции ψ_i предполагаются заданными. Как уже отмечалось ранее (см. формулу 2) разложение в ряд Фурье также представляется в соответствии с данной концепцией.

Для эффективного представления сигнала f посредством только малого количества коэффициентов c_i необходимо потребовать соответствия функции ψ_i особенностям исходного сигнала f. Реальные сигналы локализованы и во временной и в частотной области. Первое множество сигналов эффективно представляется с помощью импульсной функции Кронекера [1]:

$$\psi_i(t) = \delta_i(t) = \begin{cases} 1, k = t, \\ 0, k \neq t. \end{cases} \tag{6}$$

Компромиссным подходом для анализа сигналов является вейвлет-преобразование сигналов, основанное на кратномасштабном анализе [9]. В отличие от оконного преобразования Фурье, базисные функции вейвлет-преобразования соответствуют эффективному окну по времени, подстроенному под основные частоты сигнала, путем их масштабирования.

Под кратномасштабным анализом понимают последовательность $\{V_j\}_{j\in Z}$ замкнутых подпространств $L^2(R)$, удовлетворяющую следующим свойствам:

$$V_j \subset V_{j+1}; \tag{7}$$

$$\overline{\bigcup_{j\in Z} V_j} = L^2(R); \tag{8}$$

$$\bigcap_{j\in Z} V_j = \{0\}; \tag{9}$$

$$f(x)\in V_j \Leftrightarrow f(2x)\in V_{j+1}; \tag{10}$$

$$f(x)\in V_0 \Leftrightarrow f(x-k)\in V_0. \tag{11}$$

Существует функция $\varphi \in V_0$ такая, что $\{\varphi(x-k)\}_{k\in Z}$ образует базис Рисса в V_0.

Кратномасштабный анализ описывает последовательность вложенных аппроксимационных пространств V_j в $L^2(R)$. Если P_j является ортогональным проектором на V_j, то из условия (8) следует, что $\lim_{j\to\infty} P_j f = f$, для любой функции $f \in L^2(R)$. В силу (10) все подпространства V_j однозначно определяются из пространства V_0 при помощи соответствующего изменения масштаба одной функции φ. Функция φ называется масштабирующей функцией, если она порождает кратномасштабный анализ. Указанные пространства связаны таким соотношением, что функция f пространства V_j при масштабировании на 2 становится элементом пространства V_{j+1}.

Сигналы, представленные крадратично-интегрируемыми функциями, определенными на вещественной оси, образуют гильбертово пространство $L^2(R)$, всегда имеющее ортонормированные базисы:

$$\langle e_n, e_m \rangle = \delta_{nm}, \tag{11}$$

$$\|f\|^2 = \int |f(x)|^2 dx = \sum_n |\langle f, e_n \rangle|^2 . \tag{12}$$

В гильбертовом пространстве существуют и более общие семейства линейно независимых базисных векторов, носящие название базиса Рисса, для которых условие (12) обобщается на два неравенства:

$$\alpha\|f\|^2 \le \sum_n |\langle f, e_n \rangle|^2 \le \beta\|f\|^2 , \tag{13}$$

где $\alpha > 0, \beta < \infty$. Данные базисы являются безусловными, т.е. порядок размещения в базисе векторов может быть произвольным.

Пусть $\varphi_{j,k}(x) = 2^{j/2}\varphi(2^j x - k)$, $j,k \in Z$. Тогда, как следствие из (10) и (11), последовательность $\{\varphi_{j,k}\}_{k\in Z}$ является базисом Рисса в V_j для любого $j \in Z$.

Существует последовательность $\{h_k\}_{k\in Z}$ такая, что:

$$\varphi(x) = \sqrt{2}\sum_{k\in Z} h_k \varphi(2x-k) . \tag{14}$$

Выражение (14) называется масштабным соотношением для масштабирующих функций.

Пространство W_j определяется как ортогональное дополнение к V_j в V_{j+1}, т.е. $V_{j+1} = V_j \oplus W_j$ и $W_j \perp V_j, j \in Z$. В силу (8) и (9) имеет место следствие:

$$L^2(R) = ... \oplus W_{-1} \oplus W_0 \oplus W_1 \oplus ... = \oplus_{j \in Z} W_j . \quad (15)$$

Графическое представление кратномасштабного анализа с разложением пространства V_{j+1} на пространство V_j и ортогональное дополнение W_j показано на рисунке 10.

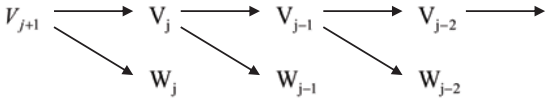


Рисунок 1. Графическое представление кратномасштабного анализа.

Существует такая функция $\psi_{j,k}(x) = 2^{j/2}\psi(2^j x - k), j,k \in Z$, называемая вейвлет-функцией, что последовательность $\{\psi_{j,k}\}_{k \in Z}$, как следствие из (14), является базисом Рисса в W_j для любого $j \in Z$, причем, существует последовательность $\{g_k = (-1)^k h_{1-k}\}_{k \in Z}$ такая, что:

$$\psi(x) = \sqrt{2}\sum_{k \in Z} g_k \varphi(2x - k) , \quad (16)$$

где $\{h_k\}$ – коэффициенты фильтрации для масштабирующей функции, $\{g_k\}$ – коэффициенты фильтрации для вейвлет-функции, которые позволяют численно находить значения φ и ψ, а также коэффициенты дискретного вейвлет-преобразования $\{d_j\}$.

В силу того, что $V_j = V_{j-1} \oplus W_{j-1}$ представляется возможным определить функцию $f(x)$, записанную в терминах базисных функций пространства V_j, в терминах базисных функций пространств V_{j-1} и W_{j-1} с учетом (14) и (16):

$$P_j f(x) = \sum_k c_{j,k}\varphi_{j,k}(x) = \sum_k c_{j-1,k}\varphi_{j-1,k}(x) + \sum_k d_{j-1,k}\psi_{j-1,k}(x) , \quad (17)$$

Соотношение (16) называется масштабным соотношением для вейвлет-функций.

Таким образом, дискретное вейвлет-преобразование определяется как отображение W, переводящее последовательности $\{c_{j,k}\}$ в последовательности $\{c_{j-1,k}, d_{j-1,k}\}$.

Выражение (17) называется быстрым вейвлет-преобразованием в связи с тем, что имеет сложность порядка $O(n)$, т.е. сложность вычислений пропорциональна длине сигнала.

Необходимо также отметить, что $\psi(x)$ из (16) определяется коэффициентами $\{g_k\}_{k \in Z}$, если определена порождающая масштабирующая функция $\varphi(x)$, которая определяется коэффициентами $\{h_k\}_{k \in Z}$ соотношения (14).

Следовательно, система масштабирующих функций и вейвлет-функций может быть определена множеством коэффициентов $\{g_k\}_{k\in Z}$ и $\{h_k\}_{k\in Z}$.

В настоящей работе вейвлет-преобразование рассматривается как разложение сигнала по системе функций, которые являются сдвинутыми и масштабированными экземплярами порождающей функции. В случае непрерывного вейвлет-преобразования декомпозиция производится для всех возможных сдвигов и масштабов.

Из (17) следует, что любую функцию $f \in L^2(R)$ можно представить на некотором заданном уровне разрешения j_n в виде:

$$f(x) = \sum_k c_{j_n,k}\varphi_{j_n,k}(x) + \sum_{j_n}\sum_k d_{j,k}\psi_{j,k}(x) \quad . \qquad (18)$$

Видно, что первый член суммы является грубым приближением сигнала, после добавления к которому членов ряда степень детализации увеличивается, т.е. увеличивается разрешение, с которым представлен сигнал. Переход от уровня j к уровню $j+1$ эквивалентен замене x на $2x$.

Методы встраивания можно классифицировать по следующим признакам [2]:

1. По способу преобразования

1. дискретное вейвлет-преобразование [9];
2. дискретное косинусное преобразование [3];
3. преобразование Фурье [8].

2. По методу преобразования данных

1. аддитивные, у которых значение необходимого коэффициента спектра меняется с помощью добавления к исходному значению некоторого числа;
2. слияние.

3. По степени различимости встроенного водяного знака

1. заметные;
2. полузаметные;
3. незаметные.

4. По характеру встраиваемого водяного знака

1. последовательность псевдослучайных чисел;
2. изображение (логотип);
3. текстовое сообщение.

5. По цели встраивания

1. защита авторских прав;
2. скрытая передача информации.

Чтобы добиться наибольшей объективности исследования и получения материала для сравнения методов между собой, будем выбирать близкие по данной классификации методы – аддитивные, использующие вейвлет-преобразование, последовательность псевдослучайных чисел и являющиеся незаметными или полузаметными для наблюдателя.

Для декомпозиции будем применять 3-уровневое дискретное вейвлет-преобразование таким образом, чтобы у нас получилось 10 подобластей.

Будем выбирать все коэффициенты, кроме тех, что принадлежат подобласти LL, что позволит получить большую устойчивость к атакам. Водяной знак – последовательность псевдослучайных чисел. Для встраивания будем использовать формулу аддитивного внедрения.

$$f^*[i][j] = f[i][j] + \alpha \cdot f^2[i][j] \cdot \omega[i][j] \tag{19}$$

Посмотрим, как выглядит изображение при встраивании ВЗ по такой формуле [9]:

В результате видим сильные отличия от оригинала. Попробуем избавиться от квадрата в правой части формулы. Получим новую формулу:

$$f^*[i][j] = f[i][j] + \alpha \cdot f[i][j] \cdot \omega[i][j] \tag{20}$$

Изображение при встраивании ВЗ по такой формуле выглядит так:

Не видно никаких изменений. Будем и дальше использовать эту формулу. Из (20) получим:

$$\omega^*[i][j] = \frac{f^*[i][j] - f[i][j]}{\alpha \cdot f[i][j]} \tag{21}$$

Для декомпозиции осуществляем n-кратное ДВП, осуществляем выбор коэффициентов путем селекции подобласти $LL_n[i][j]$, после чего вычисляется однократное вейвлет-преобразование. Подобласть LL_{n+1} оставляем без изменений, а подобласти $LH_{n+1}, HL_{n+1}, HH_{n+1}$, обнуляются для получения подобласти $LL_n'[i][j]$.

Коэффициенты LL_n заменяются по формуле

$$LL_n[i][j] = LL_n'[i][j] + k \cdot \omega[i][j] \quad (22)$$

где k – фактор, влияющий на устойчивость водяного знака к атакам.

Будем производить атаки на изображение «Лена» с разрешением 256x256 и $\alpha = 0.5$. Водяной знак представляет собой матрицу псевдослучайных чисел размером 32x32.

Результирующее изображение с внедренным водяным знаком отличается от исходного, поэтому представляет интерес исследование влияния метода на вносимые при обработке искажения [6]. В качестве меры вносимой методом встраивания ошибки, будем использовать отношение уровня сигнала к уровню шума, определяемое как $PSNR = 10\log_2 \frac{N \cdot 255^2}{\sum_{i=1}^{N}\left(I_i - \bar{I}_i\right)^2}$, где N – число пикселов в изображении, $I_i, \bar{I}_i$ – значение пикселов исходного и восстановленного изображений, соответственно.

Проведем различные атаки и вычислим значение метрики PSNR, а также значение коэффициента структурного подобия Sim [1].

Без дополнительных шумов Sim=1 PSNR=72,95107

(мозаика2) Sim=0,315789 PSNR=74,36436

(кисть) Sim=0,6507 PSNR=59,11751

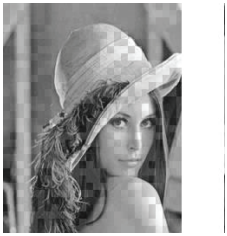
(размытие) Sim=0,85 PSNR=46,61264

(шум 0,5%) Sim=0,99 PSNR=48,29912

(шум 10%) Sim=0,8875 PSNR=45,40871

Поворот 20˚ Sim=0,5183
PSNR=46,11659

Фасет Sim=0,9353
PSNR=46,81627



Вырез 0,5173
PSNR=62,11425

Как видно из полученных результатов наибольшее значение Sim=1 получается, если не добавлять никаких шумов, т.е. не проводить никаких атак. Следовательно, в данном случае встроенный ВЗ и извлеченный ВЗ полностью идентичны. В других случаях Sim отличен от единицы, что говорит о повреждении водяного знака, но это проявляется в различной степени.

Попробуем теперь провести такие же атаки на изображение «Лена» при $\alpha = 0.1$. Аналогично проведем различные атаки и вычислим коэффициент структурного подобия Sim.

Без дополнительных
шумов Sim=1
PSNR=231,0668

(мозаика2) Sim=1
PSNR=231,0668

(кисть) Sim=0,617
PSNR=57,53342

(размытие) Sim=0,847
PSNR=46,60583

(шум 0,5%) Sim=1
PSNR=48,28651

(шум 10%) Sim=0,7546
PSNR=45,41283

Поворот 20˚ Sim=0,5216
PSNR=46,11659

Фасет Sim=0.74038
PSNR=46,81627

Вырез 0,6521
PSNR=71,0842

Проведем различные атаки для второго подхода и вычислим коэффициент структурного подобия Sim.

Без дополнительных шумов Sim= 0.8824
PSNR=231,0668

(мозаика2) Sim=1
PSNR=231,0668

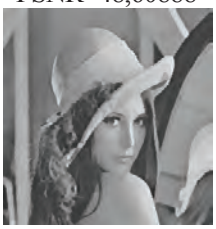
(кисть) Sim= 0.7215
PSNR=58,6964

(размытие) Sim= 0.5019
PSNR=46,1278

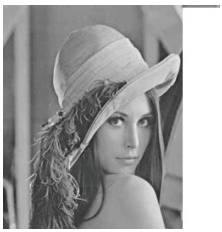
(шум 0,5%) Sim= 0.5785
PSNR=48,60888

(шум 10%) Sim=0.5047
PSNR=45,43702

Поворот 20˚ Sim= 0.4719
PSNR=46,1287



Фасет Sim=0.4982
PSNR=46,8195



Вырез 0.7418
PSNR=68.84486

После встраивания водяного знака с помощью второго подхода получаем следующее изображение:

Без дополнительных шумов Sim= 1

(мозаика2) Sim=1 PSNR=74,5929

(кисть) Sim= 1 PSNR=57,46372

(размытие) Sim= 0.9657 PSNR=45,3471

(шум 0,5%) Sim= 1 PSNR=46,5630

(шум 10%) Sim=0.5024 PSNR=45,4179

Поворот 20˚Sim= 0.3684 PSNR=45,9849

Фасет Sim=0.8472 PSNR=46,63048

Вырез Sim=1 PSNR=72,5481

Как видно из полученных результатов, первый подход хуже справляется с сохранением устойчивости водяного знака. Особенно это заметно при атаках блочности, размытия и добавления шума. Встраивание производится во все области, кроме низкочастотной, что обеспечивает меньшую надежность и робастность метода.

Проанализируем влияние мозаичной атаки разной степени интенсивности (в левой колонке – первый подход, в правой колонке – второй подход к внедрению водяного знака).

(мозаика2) Sim=1
PSNR=231,0668

(мозаика2) Sim=1
PSNR=74,5929

(мозаика3) Sim=0.4991
PSNR=47,16934

(мозаика3)
Sim=0.7208
PSNR=46,6025

(мозаика4) Sim=0.4954
PSNR=47,8743

(мозаика4)
Sim=0.5275
PSNR=48,0398

(мозаика5) Sim=0.4928
PSNR=48,23835

(мозаика5)
Sim=0.5134
PSNR=48,0398

(мозаика6) Sim=0.4545
PSNR=49,26303

(мозаика6)
Sim=0.4982
PSNR=49,1272

Для наглядности построим графики зависимости корреляции от интенсивности атаки.

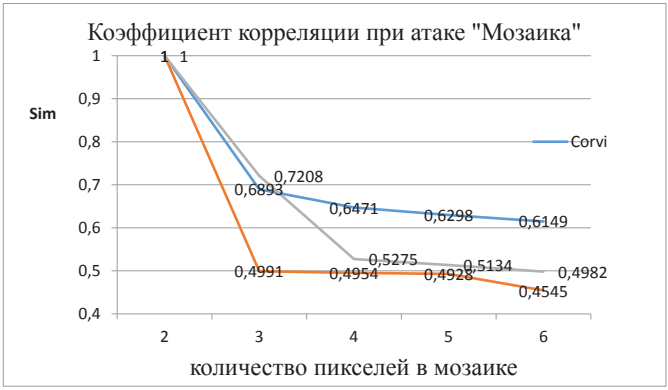


Рисунок 2 – Зависимости корреляции от интенсивности атаки

Видим, что общая закономерность зависимости схожа для всех методов, однако другие методы ведут себя несколько надежнее, чем рассмотренные, причем, первый подход показал себя хуже всех.

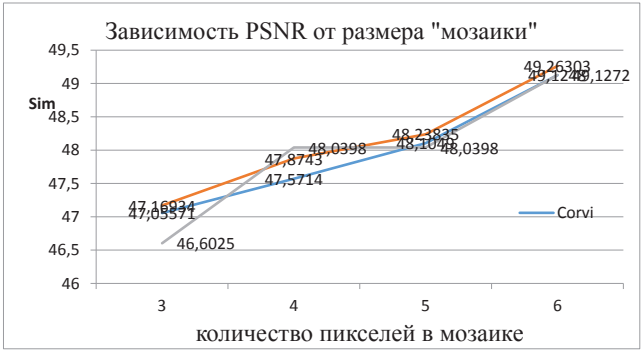


Рисунок 1 – Зависимость PSNR от размера мозаики

Проанализируем влияние атаки добавлением шума разной степени интенсивности (в левой колонке – первый подход, в правой колонке – второй подход к внедрению водяного знака)

(шум 0,5%) Sim= 0.5785
PSNR=48,60888

(шум 0,5%) Sim= 1
PSNR=46,5630

(шум 1%) Sim= 0.5367
PSNR=46,6585

(шум 1%) Sim=1
PSNR=45,4848

(шум 5%) Sim= 0.5124
PSNR=45,424

(шум 5%) Sim= 0.8333
PSNR=45,4428

(шум 10%) Sim=0.5047
PSNR=45,43702

(шум 10%) Sim=0.5224
PSNR=45,4179

(шум 20%) Sim=0.4968
PSNR=45,433

(шум 20%) Sim=0.5021
PSNR=45,4397

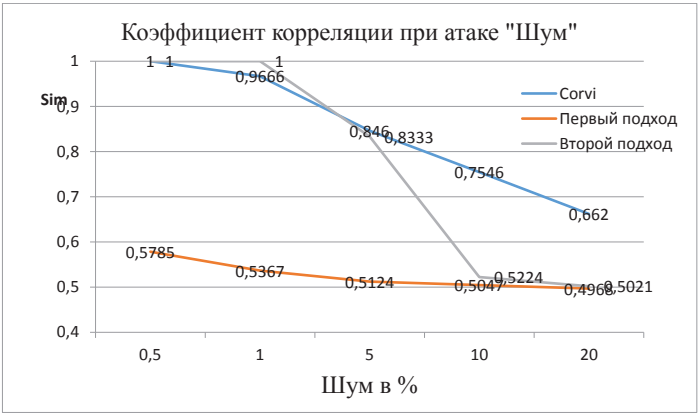


Рисунок 3 – Корреляция ВЗ при атаке "Шум"

Как видно из графиков, общий вид зависимости значения корреляции от степени интенсивности атаки очевиден: чем выше степень атаки, тем меньше корреляция. Это значит, что чем сильнее атака, тем меньше остается целых пикселей водяного знака.

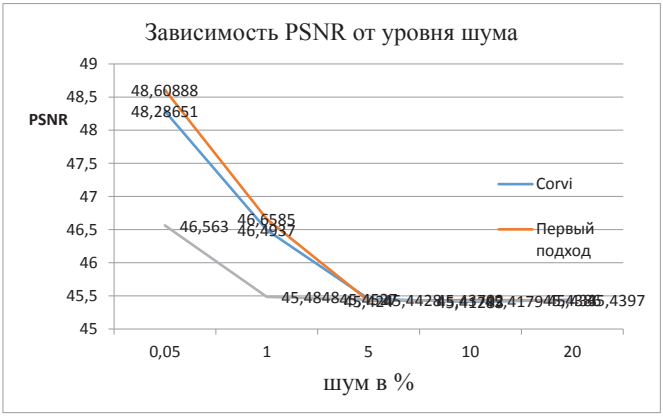


Рисунок 4 – Зависимость PSNR от уровня шума

В рассмотренных подходах коэффициент силы встраивания принимает одинаковые дробные значения, однако во втором подходе для корректной работы требуется указание целого значения k. Исследуем влияние коэффициента k на значение метрики PSNR.

Для лучшей наглядности представим результаты в виде графиков

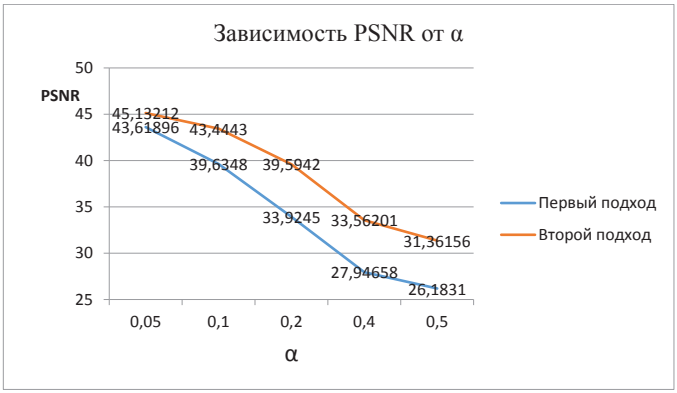


Рисунок 5 – Зависимость PSNR от α

В настоящее время во многих странах мира действуют различные ограничения на использование криптосредств, в связи с чем разработка и внедрение методов ориентированных на обеспечение безопасности информации в системах электронного документооборота представляется чрезвычайно актуальным. Необходимо также отметить, что существует широкий класс систем, где традиционные методы не обеспечивают аутентификацию мультимедийной информации, которая подвергается многократному преобразованию, или требуется дополнительный уровень защиты от копирования, который не может быть обеспечен традиционными методами.

В заключение отметим, что общая для разных подходов закономерность зависимости PSNR от данных коэффициентов одинакова: чем больше коэффициент силы встраивания, тем меньше значение метрики PSNR.

Список использованной литературы

1. Земцов А.Н. Спектральные методы компрессии триангуляционных моделей. – LAP Academic Publishing, 2011. – 152 с.

2. Земцов А.Н. Методы цифровой стеганографии для защиты авторских прав. – LAP Academic Publishing, 2011. – 148 с.

3. Земцов А.Н. Робастный метод цифровой стеганографии на основе дискретного косинусного преобразования. – Известия ВолгГТУ. – 2011. – Т.11. – №12. – С. 141-144.

4. Земцов А.Н. Сравнительный анализ эффективности методов компрессии на основе дискретного косинусного преобразования и фрактального кодирования изображений. Часть I. – Прикладная информатика. – 2011. – №4. – С. 90-104.

5. Земцов А.Н. Сравнительный анализ эффективности методов компрессии на основе дискретного косинусного преобразования и фрактального кодирования изображений. Часть II. – Прикладная информатика. – 2011. – №5. – С. 77-84.

6. Земцов, А.Н. Прогрессивная передача аудиосигналов в компьютерных сетях / А.Н. Земцов, А.В. Палашевский. – Известия ВолгГТУ. – 2006. – №4. – С. 12-15.

7. Земцов, А.Н. О выборе оптимального вейвлет-базиса в задаче компрессии триангуляционных моделей рельефа поверхности. – Известия ВолгГТУ. – 2006. – №4. – С. 144-147.

8. Земцов, А.Н. Метод встраивания данных в аудиопоток на основе модификации фазовой составляющей / А.Н. Земцов, С.Мд. Рахман. – Известия ВолгГТУ. – 2009. – Т.6. – №6. – С. 137-139.

9. Земцов, А.Н. Защита авторских прав с помощью дискретного вейвлет-преобразования / А.Н. Земцов, С.Мд. Рахман. – Известия ВолгГТУ. – 2009. – Т.6. – №6. – С. 134-136.

© А.Н. Земцов, 2014

УДК 62

Н.В. Кенийз
канд.техн.наук старший преподаватель
Кубанский государственный аграрный университет
г. Краснодар, Российская Федерация

ТЕХНОЛОГИЯ ПРОИЗВОДСТВА ЗАМОРОЖЕННЫХ ПОЛУФАБРИКАТОВ С КРИОПРОТЕКТОРАМИ

Одной из самых перспективных и молодых в России, технологий в хлебопекарной промышленности является производство хлебобулочных изделий из замороженных полуфабрикатов. Замораживание – старейший и чрезвычайно эффективный способ сохранения продуктов.

Использование замороженных хлебобулочных полуфабрикатов позволяет расширить ассортимент и обеспечить высокое качество готовых изделий, что является основной задачей хлебопекарной промышленности [1, с. 93, 2, с. 151].

Принятие такого решения, обусловлено современным ритмом жизни, в связи с чем у потребителей хлебобулочных изделий возникает, потребность в

полуфабрикатах, которые можно приготовить без больших затрат во времени. В экономически развитых странах, использование таких полуфабрикатов, находит все более широкое распространение, об этом свидетельствуют работы зарубежных ученых A. Basaran, E. A. Elhady, Pablo D. Ribotta, S. M. Van der Sluis [3, с. 23].

В России интенсивно развиваются новые технологии, в основе которых лежит замораживание полуфабрикатов хлебобулочного производства, быстрее всего они находят применение на малых предприятиях и сегменте HoReCa (отели, рестораны, кафе), так как эти технологии более гибкие в сравнении с традиционными, что очень удобно для предприятий малой мощности [4, с. 30].

Производство замороженных полуфабрикатов, позволяет контролировать безопасность и качество продуктов, быстро реагировать на изменения рынка, затраты на транспортировку готовой продукции значительно сокращаются, возможно увеличение сети пекарен, в местах реализации, из-за возможности использования минимального количества оборудования [5, с. 67].

Однако есть ряд причин, которые препятствуют быстрому внедрению новой прогрессивной технологии в отрасль. Во время замораживания тестовых полуфабрикатов происходит денатурация и агрегация белков, вызывающих потерю функциональных свойств, гибнут дрожжевые клетки вследствие образования кристаллов льда. Так же следует отметить, что при замораживании опары, теста, тестовых заготовок, происходит потеря влаги. Поэтому замораживание опары, теста, тестовых заготовок в технологии хлеба и хлебобулочных изделий, на производстве осуществляться с добавлением различных криопротекторов [6, с. 148, 7, с. 1174].

Известно использование различных криопротекторов, например как, ферментных препаратов с глюкоамилазой (ФП-ГА) и с гемицеллюлазой (ФП-ГЦ), энзимомодифицированного лецитин «Солек-К-ЕМЛ» или использовании сбивных замороженных полуфабрикатов.

Добавление криопротекторов при замораживании позволяет снизить или предотвратить денатурацию белков. Подтверждением механизма криопротекции низкомолекулярными углеводами, служат исследования J. Park и T. C Lanier. Ими доказано, что добавление сахаров (лактоза и глюкоза) к водному раствору протеинов, приводило к нежелательному самопроизвольному изменению – стабилизации раствора в изоляции от поверхности гидратированного белка. Среди веществ обладающих свойством влагоудерживающей способности, представляет интерес пектин, который в пищевой промышленности используют в кондитерском производстве, как студнеобразователь. Учитывая комплекс положительных свойств пектина, было принято решение об использовании его по новому назначению, в качестве криопротектора при производстве замороженных полуфабрикатов хлебопекарного производства [8, с. 20].

Влияние различных криопротекторов на реологию теста для полуфабрикатов. Для теста подверженного замораживанию, важными являются три основополагающих фактора: газообразование, газоудерживание, реологические свойства теста, т. к. при воздействии низких температур, происходит уменьшение газообразования, снижение газоудерживающей способности и уменьшение реологических свойств теста. Для корректировки и сохранения оптимальных данных, перечисленных факторов, используют криопротекторы – вещества одним из свойств которых, является способность удерживать влагу [9, с. 68, 10, с. 1256, 11, с. 188].

На первом этапе исследований, проводили работу по изучению влияния различных криопротекторов на реологию теста. Реологические свойства теста с применением криопротекторов, изучали на приборах фаринограф и альвеограф. В эксперименте по влиянию криопротекторов (пектин, сорбит, фруктоза) на физические свойства теста, были включены варианты с внесением криопротекторов в дозировках 0,5; 1,0; 1,5; 2,0 % к массе муки. Контролем служил образец без внесения добавок. Полученные экспериментальные данные представлены на рисунках 1, 2, 3.

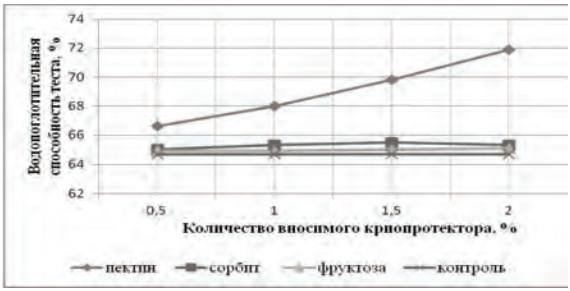


Рисунок 1 - Изменение водопоглотительной способности теста при добавлении криопротекторов

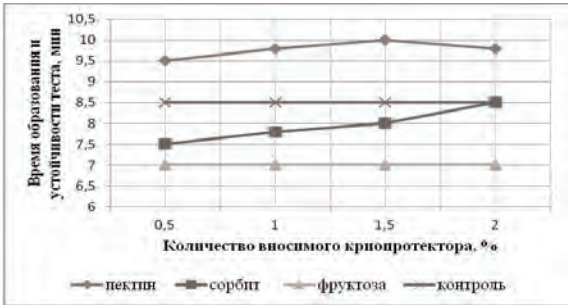


Рисунок 2 - Изменение времени образования и устойчивости теста при добавлении криопротекторов

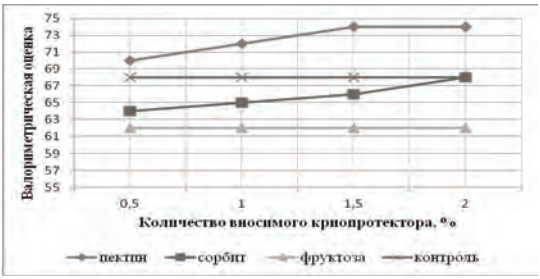


Рисунок 3 - Изменение валориметрической оценки теста при добавлении криопротекторов

Анализ данных показал, что использование пектина при замесе теста, приводит к повышению ВПС (водопоглотительная способность) теста во всех вариантах опытов в сравнении с контролем. Следует отметить, что добавление пектина приводит к увеличению времени замеса теста. Время образования и устойчивость теста, при этом увеличились с 8,5 мин у контроля, до 10 мин при внесении в тесто пектина в дозировке 1,5 %. Валориметрическая оценка во всех вариантах с пектином, была выше в сравнении с контролем на 8 е. в. При внесении сорбита и фруктозы, в таких же дозировках, показатели реологических свойств теста, были ниже в сравнении с вариантом, где вносили пектин во время замеса теста на 8 и 14 е. в. соответственно. Анализ результатов полученных на приборе фаринограф, позволил сделать вывод, что ВПС в вариантах с добавлением пектина увеличивается, благодаря способности карбоксильных групп пектина удерживать воду, что является положительным фактором при замораживании тестовых заготовок. Улучшение структурно-механических свойств теста, связано с укреплением клейковинных каркасов, за счет взаимодействия гидроксильных и свободных карбоксильных групп с аминогруппами клейковинных белков, за счет конформационных изменений в молекуле белка, приводящих к более «плотной упаковке», а также за счет способности сближения метоксилированных карбоксильных групп в водной среде, с образованием полимерных цепей пектина, что имеет немаловажное значение в технологии замороженных полуфабрикатов.

Основным показателем хлебопекарных свойств муки, является показатель «сила муки», которую определяли на приборе альвеограф. В эксперименте использовались ранее принятые дозировки криопротекторов. Полученные данные представлены в таблице 1.

Таблица 1 – Изменение реологических показателей теста при внесении криопротекторов

Показатель	Значение показателей теста при внесении криопротекторов в дозировке, %				
	Контроль (0)	0,5	1,0	1,5	2,0

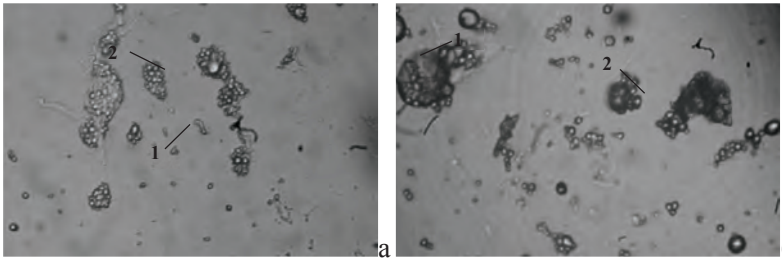
Пектин					
Сила муки, е. а.	227	235	245	247	258
Максимальное избыточное давление, мм	71	70	83	95	103
Отношение упругости к растяжимости (P/L)	0,70	0,7	1,01	1,40	1,56
Сорбит					
Сила муки, е. а.	227	221	227	230	231
Максимальное избыточное давление, мм	71	67	67	67	64
Отношение упругости к растяжимости (P/L)	0,70	0,59	0,62	0,62	0,56
Фруктоза					
Сила муки, е. а.	227	199	205	225	207
Максимальное избыточное давление, мм	71	64	64	65	59
Отношение упругости к растяжимости (P/L)	0,70	0,65	0,61	0,57	0,53

Проведенные исследования по изучению пектина, как криопротектора показывают, что он превосходит используемые в настоящее время криопротекторы, такие как фруктоза, сорбит по показателю время образования и устойчивости теста. В случае добавления пектина, разжижение теста наступало на 1,5 мин позже, по сравнению с сорбитом в дозировках 1,0; 1,5 %, а при добавлении фруктозы, в тех же дозировках на 2 и 3 мин. Показатель сила муки был также выше, при добавлении пектина на 18 и 17 е. а. в сравнении с сорбитом и 20, 22 е. а. при добавлении фруктозы. Улучшение реологии теста при добавлении пектина во время замеса, происходит потому, что пектины образуют прочный каркас, благодаря сближению гидрофобных метоксильных групп в водной среде, а свободные карбоксильные группы диссоциируют на ионы, которые на поверхности белка взаимодействуют с группами $–NH^{3+}$, так как пектины представляют собой поверхностно-активные соединения и тем самым улучшают структурно-механические свойства теста.

Так как для теста подверженного замораживанию, важными факторами являются реологические свойства, полученные данные дают основание для дальнейших исследований по изучению его влияния на качество замороженных полуфабрикатов.

Влияние криопротекторов на структуру замороженных полуфабрикатов. Методом микроскопирования было установлено, что

криопротектор влияет на связывающую способность воды в клетке, в связи, с чем тесто без добавления пектина и с пектином имеет различные физические свойства рисунок 5.



а б

Рисунок 5 - Микрофотографии замороженного дрожжевого теста:
а) без внесения криопротектора, б) с добавлением пектина
(1 – белок, 2 – крахмальные зерна)

В образце без добавления криопротектора полимерные цепи крахмала и белка представляют собой сжатую уплотненную структуру. При добавлении пектина во время замеса теста, на срезе образца явно видно увеличение полимерных цепей за счет образования белково-полисахаридных комплексов. В работах Р. К. Хосни отмечается, что на стеклование полимерной цепи влияют количество и размер замещающих групп (т. е. боковых цепей). В случае присоединения пектина к полимерным цепям белка и крахмала, его боковые цепи выступают в роли пластификатора и понижают температуру стеклования. Полученные результаты позволяют сделать вывод, что добавление пектина приводит к образованию белково-полисахаридных комплексов, позволяющих снизить температуру стеклования.

Из литературных источников известно, что увеличение молекулярной массы полимера также снижает температуру стеклования. В наших исследованиях, добавление пектина увеличивает молекулярную массу полимеров и это тоже является положительным фактором при замораживании тестовых полуфабрикатов.

Таким образом, можно сделать заключение, что добавление пектина при замесе теста предназначенного для замораживания позволяет снизить температуру стеклования, за счет увеличения молекулярной массы полимера, образовывая белково-полисахаридные комплексы, кроме того боковые цепи пектина в разветвленной структуре полимера выступают в роли пластификатора и дополнительно понижают температуру стеклования.

Влияние скорости замораживания на структуру кристаллов льда. В работе L. J. Hayes скорость замораживания, определяется относительно скорости движения фронта замораживания. Этот подход также принят в «Красной книге» Международного института холода.

Скорость замораживания определяет тип, размер и распределение образовавшегося льда, который может быть представлен вне- и внутриклеточным льдом, древовидным или сфералитным льдом (в быстрозамороженных водных растворах), иногда частично ограниченного пищевым матриксом. При использовании очень высоких скоростей охлаждения, можно полностью избежать образования льда, и вместо этого добиться витрификации, до стеклообразного состояния.

Обзорная информация по процессам кристаллизации льда в пищевых продуктах, представлена в работах авторов C. A. Angell, J. M. V. Blanshard, F. Franks, J. Garside. Вследствие трудностей интерпретации результатов измерений доли образовавшегося льда, в сложных пищевых матриксах, большинство исследований проводилось на модельных системах, представлявших собой водные растворы [12, с. 95, 13, с. 257].

Более крупные кристаллы льда, образуются при медленном замораживании. Более мелкие кристаллы - при быстром. Какие кристаллы (крупные или мелкие) более предпочтительны, зависит от цели замораживания – при производстве мороженного, кристаллы льда должны быть по возможности, как можно мельче, так как готовый продукт получается более гомогенным, а текстура - более гладкой. Тем не менее, при концентрировании жидких продуктов вымораживанием, крупные кристаллы льда удобнее отделять от концентрата. Для сублимационной сушки пищевого продукта, желательно образование небольшого числа крупных кристаллов, это позволяет ускорить последующий процесс сублимации.

На начальном этапе процесса замораживания вода, присутствующая в пищевом продукте, мигрирует и присоединяется к растущим кристаллам льда. При быстром замораживании, растительных или животных тканей, вода сквозь клеточную мембрану не проникает, и внутри клетки образуются мелкие равномерно распределенные кристаллы льда.

Скорость замораживания пищевых продуктов в промышленных условиях, как правило, слишком мала для образования внутриклеточного льда. При медленном замораживании пищевых продуктов, образуются крупные кристаллы льда, которые заполняют межклеточное пространство и вызывают дегидратацию клеток. Кристаллы льда разделяют клетки или тканевые волокна, несмотря на то, что в быстро замороженных пищевых продуктах образуются мелкие кристаллы льда, в результате процесса, называемого рекристаллизацией или созреванием Оствальда, со временем они могут становиться крупнее. При хранении замороженных пищевых продуктов, рекристаллизация происходит вследствие того, что более крупные кристаллы термодинамически более стабильны, благодаря относительно небольшой поверхностной энергии. Температурные градиенты усиливают рекристаллизацию во время замораживания или размораживания продуктов. Температурные колебания, в течении продолжительного холодильного

хранения, при транспортировке и хранении в бытовых холодильниках (температура режима размораживания в домашнем холодильнике с опцией «frost-free» может повышаться почти до 0 °С), рекристаллизация также усиливается.

Влияние криопротекторов на активность дрожжевых клеток при замораживании. Диапазон температур, которые используются при замораживании, определяется ингредиентами. Основной компонент, на который можно воздействовать посредством изменения температур – это дрожжи, которые делают тесто и тестовые заготовки воздушными. Также немаловажное значение имеют энзимы, которые играют роль катализатора в биохимических реакциях, они решающим образом способствуют формированию вкуса, цвета и аромата готового изделия. Поэтому помимо выбора подходящего криопротектора, важную роль играют различные температурные режимы замораживания [3, с. 85, 4, с. 60].

С целью подбора оптимального температурного режима замораживания, было подвержено замораживанию 16 образцов. Первые 8 образцов (контроль, с добавлением пектина, сорбита, фруктозы) были заморожены при температуре (-18) ^{o}С, вторые 8 образцов (контроль, с добавлением пектина, сорбита, фруктозы), были заморожены при температуре (-4) ^{o}С, срок хранения их составлял 30 суток. Далее образцы была разморожены в ЭМП СВЧ (выходная мощность: 800 Вт, мощность: 1150 Вт) и в условиях цеха (при температуре 20 оС и относительной влажности воздуха 40 %), после чего методом подсчета микроорганизмов в счетной камере Тома Цейсса, было посчитано количество живых и мертвых дрожжевых клеток.

Поэтому проводились исследования по изучению активности дрожжевых клеток, с различными криопротекторами при различных режимах замораживания (-4); (-18) ^{o}С и размораживания в условиях ЭМП СВЧ и в обычных условиях цеха. Подсчитывали количество дрожжевых клеток микроскопированием в камере Тома Цейсса.

Данные экспериментов по подсчету дрожжевых клеток при различных условиях замораживания и размораживания в ЭМП СВЧ и условиях цеха представлены в таблице 2.

Таблица 2 – Количество дрожжевых клеток в тесте, с различными криопротекторами, приготовленного при различных условиях замораживания и размораживания

Вносимый криопротектор	Содержание в тесте		
	КОЕ (кл/см^3)	живые дрожжевые клетки, %	мертвые дрожжевые клетки, %
Тесто без замораживания			
Контроль	$3{,}1 \cdot 10^9$	95,5	4,5

Пектин	$2,98 \cdot 10^9$	97,0	3,0
Сорбит	$2,28 \cdot 10^9$	95,5	4,5
Фруктоза	$2,0 \cdot 10^9$	86,5	13,5
Замораживание при (-18) ^oC			
Размораживание в ЭМП СВЧ			
Контроль	$1,1 \cdot 10^9$	97,5	2,5
Пектин	$1,94 \cdot 10^9$	98,0	2,0
Сорбит	$1,91 \cdot 10^9$	96,0	4,0
Фруктоза	$1,74 \cdot 10^9$	97,0	3,0
Размораживание в условиях цеха			
Контроль	$0,78 \cdot 10^9$	80,0	20,0
Пектин	$2,0 \cdot 10^9$	96,0	4,0
Сорбит	$1,56 \cdot 10^9$	84,0	16,0
Фруктоза	$1,4 \cdot 10^9$	97,0	3,0
Замораживание при (-4) ^oC			
Размораживание в ЭМП СВЧ			
Контроль	$0,13 \cdot 10^9$	95,0	5,0
Пектин	$1,68 \cdot 10^9$	96,0	4,0
Сорбит	$1,32 \cdot 10^9$	95,5	4,5
Фруктоза	$1,62 \cdot 10^9$	98,5	1,5
Размораживание в условиях цеха			
Контроль	$0,96 \cdot 10^9$	87,0	13,0
Пектин	$2,18 \cdot 10^9$	97,0	3,0
Сорбит	$1,4 \cdot 10^9$	94,0	6,0
Фруктоза	$0,74 \cdot 10^9$	93,0	7,0

Из приведенной таблицы видно, что количество дрожжевых клеток, подверженных замораживанию при различных температурах больше в образце с добавлением пектина, в отличие от образцов с сорбитом, фруктозой и контрольным образцом. При температуре (-4) ^oC активность дрожжей является максимально низкой, но без вымораживания клеточной воды содержащейся в тесте, так как при температуре до (-7) ^oC не происходит энергоинтенсивного перехода из одного агрегатного состояния в другое, активность энзимов сохраняется. При температуре (-18) ^oC брожение дрожжей полностью прекращается, активность энзимов сильно замедляется, но не прекращается полностью. Температурный режим стоит выбирать в зависимости от срока хранения изделий [35]. Данный опыт был заложен на 30 суток, поэтому количество дрожжевых клеток преобладает в первом опыте, с замораживанием при (-18) ^oC. В выборе условий для размораживания видно, что размораживание в условиях цеха, является более щадящей для дрожжевых клеток, чем размораживание в ЭМП СВЧ, рисунок 6.

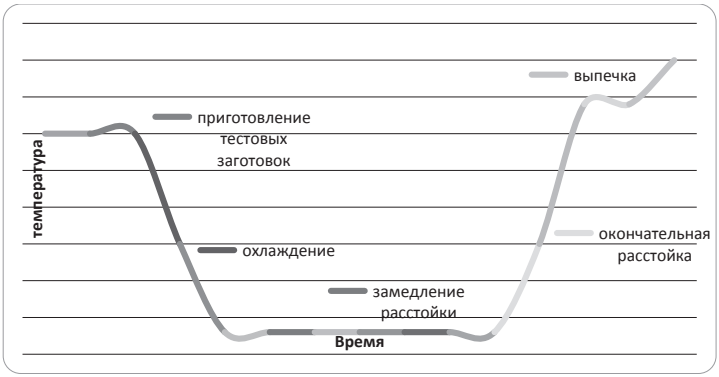


Рисунок 6 - Замедление расстойки тестовых заготовок

Процесс замедления расстойки, позволяет продлить время расстойки, при температуре хранения до (-6) ^{o}C. При этом активность дрожжей снижается до минимума, однако не превышает значения энергоинтенсивного порога замораживания. Активность энзимов лишь замедляется, но не прекращается полность, при таком ведении процесса становится возможным производить хлебобулочные изделия, обладающие высокими вкусовыми качествами, при сравнительно низких энергозатратах.

Как видно из рисунка 7, прерывание расстойки при температуре до (-18) ^{o}C приводит к полной остановке активности дрожжей, в то время как активность энзимов продолжается, но на более низком уровне. Данная технология позволяет хранить изделия более длительное время, что экономически выгодно при производстве маленьких партий выпечки и достаточно широкого ассортимента [105].

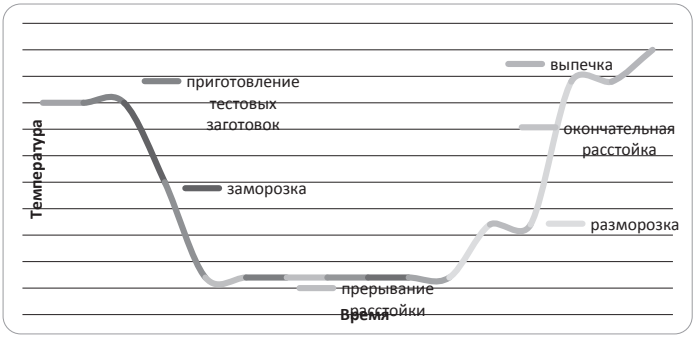


Рисунок 7 - Прерывание расстойки

Изучение состояния влаги в тесте с криопротекторами, методом ядерно-магнитного резонанса (ЯМР). Состояние влаги, ее формы и прочность связи

со структурными элементами теста, определяли методом ядерного магнитного резонанса (метод спинового эха).

В основе метода ЯМР-спектроскопии лежит определение величины времени протонной магнитной релаксации. Релаксация - это переход между энергетическими состояниями, восстанавливающий обычное больцмановское распределение. Такой переход, как правило, не сопровождается радиочастотным излучением. Существуют различные типы и механизмы релаксации.

На исследуемое вещество, находящееся в магнитном поле, через определенные промежутки времени накладывают кратковременные электромагнитные импульсы в области резонансного поглощения, а в приемной катушке появляется сигнал спинового эха, максимальная амплитуда которого связана со временем перехода ядра водорода из возбужденного состояния, в нормальное. Время протонной магнитной релаксации позволяет судить о подвижности молекул воды в исследуемом образце.

При поглощении ядром кванта электромагнитного излучения оно переходит на более высокий энергетический уровень - т.е. имеет место поглощение излучения, которое регистрируется ЯМР-спектрометром. Поглощение электромагнитного излучения происходит не точно при определенной частоте, а в пределах некоторого интервала частот – т.е. реальные линии поглощения в спектрах ЯМР являются уширенными.

Выявление лучшего криопротектора проводили на ЯМР-анализаторе, по характеристикам водосвязывающей и водоудерживающей способности вещества. Исследования по изучению водопоглотительной способности теста, были спланированы в различных вариантах: после замеса, через 15 мин и через 30 мин после замеса. В каждом варианте исследовались по четыре образца: контроль, с добавлением пектина, сорбита и фруктозы в количестве 1,5 % к массе муки. Графическая интерпретация данных водопоглотительной и водосвязывающей способности теста после замеса, представлена на рисунке 8.

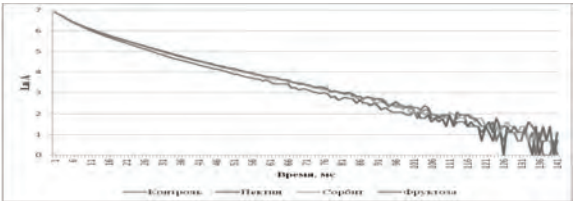


Рисунок 8 - Водопоглотительная и водосвязывающая способность теста после замеса с добавлением пектина, сорбита, фруктозы в количестве 1,5 % к массе муки

На основании анализа характера зависимостей спадов интегральной интенсивности протонов воды, в исследуемых образцах определяли группы

протонов воды с различными значениями времени спин-спиновой релаксации: Т21 = 0,1- 10 мс (W_1), Т22 = 10 - 125 мс (W_2), Т23 =125 - 500 мс (W_3), которые рассматривали как фракции влаги с различной прочностью связи. Выделенные формы связи влаги в исследуемых образцах были охарактеризованы как W_1 – осмотически удерживаемая, связанная влага, W_2 – влага слабосвязанная полезная (обеспечивает оптимальную консистенцию теста), W_3 – влага слабосвязанная избыточная (которая при понижении температуры образует кристаллы).

Из рисунка 8 видно, что поглощение воды, в тесте с добавлением пектина, проходило интенсивнее в сравнении с контролем и другими криопротекторами. W_3 – влага слабосвязанная избыточная (которая при понижении температуры образует кристаллы) в случае добавления пектина отсутствует.

Полученные результаты доказывают, что пектин, внесенный в тесто, в количестве 1,5 % к массе муки, обладает лучшей водоудерживающей и водосвязывающей способностью. Следовательно, по сравнению с другими криопротекторами, пектин имеет преимущества, так как влага в связанном состоянии препятствует образованию кристаллов льда, что предотвращает гибель дрожжевых клеток.

Влияние условий размораживания на качество замороженных тестовых полуфабрикатов. При проведении эксперимента, по влиянию условий размораживания полуфабрикатов из дрожжевого теста, были заморожены 8 образцов, без предварительной расстойки тестовых заготовок по 2 образца: контрольный, с добавлением пектина, с сорбитом и с фруктозой, с дозировкой 1,5 % к массе муки. Размораживание образцов проводили в условиях цеха и в условиях ЭМП СВЧ.

Следует отметить, что при размораживании в ЭМП СВЧ в тесте с добавлением пектина, процесс брожения начался быстрее и интенсивнее, о чем судили по увеличению объема тестовой заготовки, по сравнению с другими образцами, присутствующими в эксперименте. Процесс расстойки сократился в 2,5 раза, по сравнению с размораживанием таких же образцов, в условиях цеха, рисунок 9.

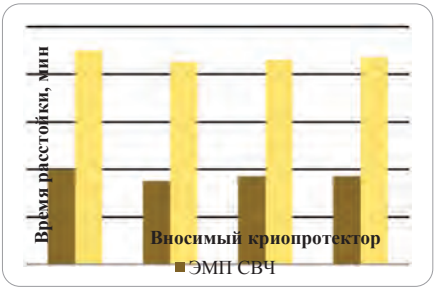


Рисунок 9 - Влияние размораживания тестовых полуфабрикатов на длительность расстойки

Полученный результат, можно объяснить изменениями в структуре крахмальных зерен под действием обработки ЭМП СВЧ. При постепенном нагревании тестовой заготовки за счет повышения его атакуемости ферментами происходит гидролиз крахмала, повышается сахаробразующая способность и как следствие повышение газообразующей способности теста.

Расстоявшиеся тестовые заготовки выпекали в печи «Муссон-ротор» модель 33. В готовых изделиях проводилась оценка физико-химических показателей качества, таблица 3.

Таблица 3 - Физико-химические показатели качества хлеба

Наименование показателя	Значение показателей при размораживании в							
	ЭМП СВЧ				условиях цеха			
	Контроль	Криопротектор			Контроль	Криопротектор		
		пектин	сорбит	фруктоза		пектин	сорбит	фруктоза
Влажность мякиша, %	42,4	43,0	43,5	42,3	41,6	40,0	40,5	41,5
Кислотность мякиша, град	1,4	1,6	1,4	1,6	1,4	1,6	1,4	1,4
Пористость мякиша, %	77,1	81,4	78,6	77,0	77,4	78,2	73,8	74,8

Образцы хлеба с добавлением пектина при замесе теста, замораживании при температуре (-18) ^{o}C и размораживании в ЭМП СВЧ, во всех вариантах эксперимента по физико-химическим показателям были в пределах норм ГОСТ Р 52462-2005. При размораживании в условиях цеха эти показатели отличались незначительно от требований стандарта.

Выбор рационального режима для выпечки хлебобулочных изделий из замороженных полуфабрикатов. При выборе наиболее рационального температурного режима, для выпечки хлеба из замороженных полуфабрикатов, были спланированы два варианта: первый с постепенным повышением температуры до 220 ^{o}C при начальной температуре 180 ^{o}C, второй с предварительной обжаркой при температурах 250 ^{o}C и дальнейшим снижением температуры до 220 ^{o}C, рисунок 10.

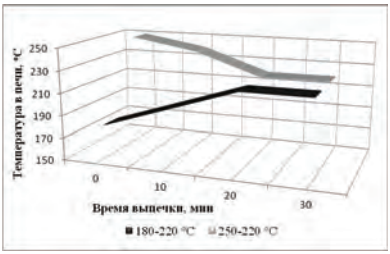


Рисунок 10 - Изменение температуры при различных вариантах выпечки

Во втором варианте выпечки, при температуре 250 °С, с последующим снижением температуры до 220 °С, органолептические показатели качества хлеба были выше на 1 балл, чем в первом варианте. Органолептическую оценку качества хлеба проводили по бальной шкале предложенной И. И. Василенко РАСХН. Общая хлебопекарная оценка была 28 баллов в первом варианте и 29 баллов во втором варианте. С учетом энергозатрат, был выбран вариант с температурой выпечки 180-220 °С. Таким образом, можно сделать заключение, что предлагаемая технология хлеба, приготовленного из замороженных полуфабрикатов с пектином, размороженных в условиях ЭМП СВЧ и выпеченных при температуре 180-220 °С, может быть рекомендована для сектора рынка HoReCa и для производства в сетях быстрого питания.

Математическую обработку экспериментальных данных проводили, с использованием программ Statistika 6.0. В результате было получено уравнение регрессии, описывающее взаимосвязь пористости хлеба с дозировкой пектина и водопоглотительной способностью теста.

После исключения незначимых членов получили уравнения регрессии, адекватность которых проверяли по критерию Стьюдента, уровень значимости - 0,05.

Графическая интерпретация полученной зависимости представлена на рисунке 11.

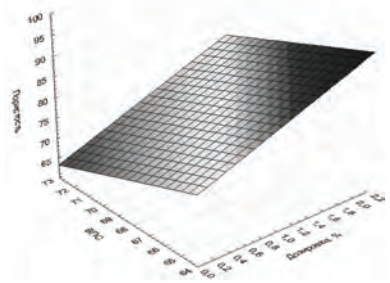


Рисунок 11 - Взаимосвязь показателя пористость хлеба от факторов: а) дозировка пектина, б) ВПС

$y_n = 177{,}76 + 7{,}58x_1 - 1{,}57x_2$,

$У_п$ – пористость;

X_1, - дозировка пектина;

X_2 - водопоглотительная способность теста.

Коэффициент множественной детерминации $R^2 - 0{,}905$.

На основании проведенных исследований разработана технология хлеба «Зимний», на основе замороженных полуфабрикатов с использованием пектина в качестве криопротектора, на который разработана техническая документация ТУ 9114-142-0493202-13, ТИ и РЦ.

Основные выводы и результаты работы

Проведены комплексные исследования по изучению криопротекторных свойств пектина и его возможности использования в технологии замороженных полуфабрикатов, на основе которых разработана технология хлеба с учетом способов замораживания, размораживания и выпечки хлеба. На основании проведенных исследований, сделаны следующие выводы:

1. Научно обоснованы и даны практические рекомендации по применению пектина в качестве криопротектора в технологии хлеба из замороженных полуфабрикатов.

2. Показано, что замораживание теста с пектином при температуре (-18) ^oC и при размораживании с использованием ЭМП СВЧ способа, являются более благоприятными условиями для активности и жизнедеятельности дрожжевых клеток, в этом случае отмечено 98 % живых клеток, против 80 % в полуфабрикате без пектина.

3. Установлено на приборе ЯМР-анализаторе, что при замесе теста с пектином в дозировке 1,5 % к массе муки происходит интенсивное связывание воды, после замеса теста, что подтверждается отсутствием в образце с пектином влаги W_3 – (слабосвязанная, избыточная), которая при понижении температуры образует кристаллы.

4. Выявлено, что наилучшие показатели качества готового хлеба достигаются при использовании ЭМП СВЧ способа размораживания тестовых полуфабрикатов, учитывая энергозатраты, был выбран рациональный способ выпечки с начальной температурой 180 ^oC и допеканием при температуре 220 ^oC, пористость хлеба в этом случае была 78,2 %.

5. Методом математического моделирования определена оптимальная дозировка пектина, 1,5 % к массе муки, для замороженных полуфабрикатов, получены уравнения зависимости пористости хлеба от дозировки криопротектора и физических свойств теста (сила муки, показатель P/L, ВПС, валориметрическая оценка), позволяющие прогнозировать и регулировать реологические свойства теста для замороженных полуфабрикатов.

6. Разработана технологическая схема производства хлеба из замороженных полуфабрикатов с пектином в качестве криопротектора, пакет технической

документации на хлеб «Зимний» (ТУ 9114-142-0493202-13) из замороженных полуфабрикатов. Ожидаемый экономический эффект от продажи 1 тыс. т хлеба произведенного из замороженных полуфабрикатов с использованием пектина в качестве криопротектора составит 2,5 млн р.

Список использованной литературы:

1. Кенийз, Н. В. Технология производства хлеба из замороженных полуфабрикатов с использованием пектина в качестве криопротектора / Н. В. Кенийз, Н. В. Сокол // Вестник Мичуринского государственного аграрного университета. – 2011. – № 2-2. – С. 92-94.
2. Кенийз Н. В. Влияние технологических параметров на производство хлебобулочных полуфабрикатов [Текст] / Н. В. Кенийз // Молодой ученый. – 2014. – №10. – С. 150-153.
3. Кенийз Н. В. Технология замороженных полуфабрикатов с применением криопротекторов / Н. В. Кенийз, Н. В. Сокол. – Саарбрюккен: Palmarium Academic Pudlishing, 2014. – 129 с.
4. Кенийз Н.В. Разработка технологии хлеба из замороженных полуфабрикатов с использованием пектина в качестве криопротектора: дис. ... канд. техн. наук: 05.18.01 / Кенийз Надежда Викторовна. – Воронеж, 2013. – 163 с.
5. Кенийз, Н. В. Процесс замораживания хлебобулочных полуфабрикатов с добавлением криопротекторов и его влияние на структуру замороженных полуфабрикатов [Текст] / Н. В. Кенийз, Н. В. Сокол // Молодой ученый. – 2014. – №5. – С. 67-70.
6. Кенийз Н. В. Влияние различных криопротекторов на реологию теста для полуфабрикатов [Текст] / Н. В. Кенийз, Н. В. Сокол // Молодой ученый. – 2014. – №10. – С. 147-150.
7. Кенийз Н. В. Влияние криопротекторов на активность дрожжевых клеток при замораживании хлебобулочных полуфабрикатов / Н. В. Кенийз, А. А. Пархоменко // Политематический сетевой электронный научный журнал Кубанского государственного аграрного университета (Научный журнал КубГАУ) [Электронный ресурс]. – Краснодар: КубГАУ, 2014. – №07(101). С. 1172 – 1179. – IDA [article ID]: 1011407076. – Режим доступа: http://ej.kubagro.ru/2014/07/pdf/76.pdf, 0,5 у.п.л.
8. Кенийз, Н. В. Разработка технологии хлебобулочных полуфабрикатов с применением криопротектора / Н. В. Кенийз, Н. В. Сокол // Новые технологии. – 2013. – № 1. – С. 19-24.
9. Кенийз, Н. В. Влияние пектина как криопротектора на водопоглотительную способность теста и дрожжевые клетки / Н. В. Кенийз // Вестник Казанского государственного аграрного университета. – 2013. – Т. 3. № 29. – С. 67-69.

10. Кенийз, Н. В. Изучение состояния влаги в тесте с криопротекторами, методом ядерно-магнитного резонанса / Н. В. Кенийз, Н. В. Сокол // Политематический сетевой электронный научный журнал Кубанского государственного аграрного университета (Научный журнал КубГАУ) [Электронный ресурс]. – Краснодар: КубГАУ, 2014. – №04(098). С. 1254 – 1260. – IDA [article ID]: 0981404090. – Режим доступа: http://ej.kubagro.ru/2014/04/pdf/90.pdf, 0,438 у.п.л.

11. Кенийз, Н. В. Определение содержание свободной и связанной влаги в тесте с добавлением криопротекторов [Текст] / Н. В. Кенийз // Молодой ученый. – 2014. – №4. – С. 187-189.

12. Кенийз, Н. В. Влияние дефростации в технологии хлеба из замороженных полуфабрикатов на качество готового продукта / Н. В. Кенийз, Н. В. Сокол // Вестник НГИЭИ. – 2011. – Т. 2. № 2 (3). – С. 92-101.

13. Kenijz, N. V. Pectic substances and their functional role in bread-making from frozen semi-finished products / N. V. Kenijz, N. V. Sokol // European Online Journal of Natural and Social Sciences. – 2013. – Т. 2. № 2. – С. 253- 261.

© Н.В. КЕНИЙЗ, 2014

УДК629.027

А.Н. Мамаев, Т.А. Балабина
г. Москва, Университет машиностроения

ИССЛЕДОВАНИЯ ПО КАЧЕНИЮ ЭЛАСТИЧНЫХ КОЛЕС

Характерной особенностью колесных машин является наличие у них эластичных колес, во многом определяющих надежность, экономичность, тягово-эксплуатационные показатели, нагрузочный режим трансмиссии, устойчивость и управляемость, проходимость машин. Это определяет то внимание, которое уделялось и уделяется теории качения, исследованию кинематических и силовых параметров колес, проблеме их износостойкости и т.п.

Теория качения стала обширным разделом прикладной механики, базирующимся как на теории упругости и, в частности, на ее контактной задаче, так и на разработке приближенных методов решения задач о качении. Исследованиями в этой области занимались многие ученые: Я.С.Агейкин, Д.А.Антонов, И.В.Балабин, В.П.Бидерман, В.П.Бойков, Н.Ф.Бочаров, Р.В.Вирабов, Н.И.Глаголев, В.П.Горячкин, А.Ю.Ишлинский, Н.К.Куликов, Ш.Кулон, В.И.Кнороз, И.В.Крагельский, А.С.Литвинов, В.Н.Наумов, В.И.Новопольский, Н.П.Петров, В.А.Петрушов, Ю.В.Пирковский,

А.Ф.Полетаев, М.М.Саверин, Г.Фромм, Е.А.Чудаков, А.Шалламах и многие другие.

В настоящее время существует несколько гипотез, объясняющих механизм сопротивления качению эластичных колес: относительное проскальзывание, адгезия и межмолекулярное взаимодействие, несовершенство упругих свойств материала и др.

Некоторые исследователи, например, Томлинсон[1], при рассмотрении процесса качения основную роль в трении качения отводят межмолекулярному взаимодействию соприкасающихся поверхностей. Сопротивление качению, согласно этой теории, объясняется тем, что взаимодействующие поверхности сближаются настолько, что между ними возникают силы атомно-молекулярного взаимодействия, на преодоление которых и расходуется подводимая к телу качения энергия.

Согласно адгезионной теории [2, 3, 4] трение характеризуется сменой адгезионных связей в результате относительного перемещения тел. При перекатывании одного тела по другому [2] происходит образование и разрыв элементарных контактных связей, сопровождающихся мгновенным увеличением давления, вспышками температуры, то есть имеет место точечное сваривание контактирующих элементов.

В работах [5, 6] сопротивление качению рассматривается как суммарный эффект несовершенной упругости реально твердых тел и их поверхностного молекулярного взаимодействия, которые в свою очередь определенным образом зависят от радиусов взаимодействующих цилиндров.

Боуден и Тейбор[7] основную роль в сопротивлении качению отводят несовершенной упругости материала. Величина же потерь от проскальзывания по их мнению незначительна и ею можно пренебречь.

Аналогичный подход и у Р.Друтовского[8, 9, 10], хотя он и отмечает, что при определенных условиях режима свободного качения потери на скольжение могут превышать гистерезисные потери.

Е.А.Алепин[11], исходя из условия, что работа, необходимая на горизонтальное перемещение колеса, затрачивается на работу сил внутреннего трения в резине, а нормальное давление распределено по площади контакта равномерно, получает простую формулу для приближенного определения коэффициента сопротивления качению цилиндрического колеса с массивной резиновой шиной: $f = 0.12\sqrt{W/2r}$, где W - прогиб колеса, r- радиус колеса.

Большая часть исследований по качению колеса - Г.Фромма[12, 13, 14]Г.Порицкого[15], Н.И.Глаголева[16], А.Ю.Ишлинского[17, 18], А.С.Литвинова[19], Р.В.Вирабова[20-23] и др. основана на схеме О.Рейнольдса[24, 25], первым обнаружившим в зоне контакта перекатываемых тел зоны сцепления и скольжения. Появление зон скольжения Рейнольдс объяснил различием деформации взаимодействующих тел в зоне контакта. Так, рассматривая качение цилиндра по плоскости, он предположил, что если

рабочая поверхность цилиндра в зоне контакта сжимается, а плоскости - растягивается, то, естественно, возникают участки, в пределах которых растяжение-сжатие поверхностных слоев тел изменяется, и, следовательно, происходит упругое скольжение. Рейнольдс первым установил экспериментально разницу между длиной пути, проходимого катком за один оборот, и длиной его окружности, т.е. явление, называемое «кажущимся скольжением».

Рассматривая качение двух цилиндров друг по другу Г.Фромм, принимая эллиптический закон распределения нормальных давлений пришел к выводу о существовании в зоне контакта в общем случае трех участков: двух участков скольжения на входе и выходе из контакта и участка сцепления, расположенного между ними. Однако при выполнении условия $\frac{a}{\mu}(\frac{1}{r_1}-\frac{1}{r_2})$ <1(где r_1 и r_2 - радиусы взаимодействующих цилиндров, a- полуширина полоски контакта, μ - коэффициент трения скольжения), первый участок скольжения исчезает и зона контакта делится на два участка: участок сцепления, расположенный со стороны входа в контакт, и участок скольжения на выходе из контакта .

Предполагая, что зона контакта делится на участок сцепления, расположенный со стороны входа в контакт, и участок скольжения на выходе из контакта, Н.И.Глаголев[16] получил для координат границы участков сцепления и скольжения и для касательных напряжений на этих участках уравнения, аналогичные полученным Г.Фроммом.

А.Ю.Ишлинский, рассматривая качение цилиндрических катков [17, 18] в двух случаях - абсолютно жесткого катка по плоскому упругому основанию и деформируемого катка по абсолютно жесткому основанию, как и О.Рейнольдс, делит площадь контакта на зоны сцепления и скольжения.

Отмечая зависимость силы трения качения от величины рейнольдского проскальзывания, А.Ю.Ишлинский в то же время подчеркивал неизбежное наличие другой его составляющей - потерь от несовершенной упругости материала.

Э.В.Петров[26 – 28], исследуя сопротивления качения ведомого колеса с массивной резиновой шиной, также сводит потери на качение к двум видам: потерям на проскальзывание и потерям на радиальный гистерезис. На основании экспериментальных данных он получает эмпирическую формулу для расчета коэффициента сопротивления качению массивной резиновой шины по твердому горизонтальному основанию $f = 0{,}0044 + 0{,}072C_f\sqrt[3]{F_n}$, где C_f - коэффициент увеличения потерь.

Исследованию взаимодействия пневмоколеса с жестким основанием посвящена и работа Э.Б.Станкевича[29]. Автор рассматривает пневмоколесо как упругий цилиндр. Анализ его взаимодействия с жестким основанием в ведущем режиме качения проводится методами теории упругости. На

основании выполненного решения для принятой расчетной схемы колеса получены зависимости для приближенного определения его силовых и кинематических параметров.

Е.В.Кленников[30] считает шину анизотропной оболочкой и приводит теоретическое исследование продольных и касательных напряжений, возникающих в контакте шины при действии на колесо вертикальной нагрузки и крутящего или тормозного моментов. В основе исследования лежит теория тонких гибких оболочек при следующих допущениях: при деформировании боковины шины основную нагрузку несет кордная нить; не учитывается неплоское искривление нитий и несимметричность эпюры контактных напряжений, обусловленных сопротивлением качению колеса; коэффициент насыщенности рисунка протектора считается непрерывной функцией, постоянной для каждой точки контакта.

Касательные напряжения в контакте определяются, исходя из равновесия деформированного элемента коронной части шины. Предполагается, что с ростом деформации элементов протектора от действия на колесо крутящего или тормозного моментов касательные напряжения увеличиваются по линейному закону в направлении от передней части контакта к задней. В результате было установлено, что дополнительные касательные напряжения, возникающие в контакте колеса от действия крутящего или тормозного моментов, могут быть выражены как$\Delta\tau_x = F_t\ (1- \varphi/\varphi_1)/A$,где φ - угловая координата элемента протектора с полюсом в центре колеса, φ_1 - угол полуконтакта, F_t - тяговая или тормозная сила, приложенная к колесу, A - площадь контакта.

Оценивая результаты этой работы, необходимо отметить, что линейный закон дополнительных касательных напряжений, на наш взгляд, может иметь место только в зоне сцепления, а в зонах скольжения они изменяются по закону, подобному закону распределения удельных давлений).

Аналогично рассматривает вопросы взаимодействия пневматического колеса с опорной поверхностью В.И.Кнороз[31]. Эта работа обращает на себя внимание большим объемом экспериментов по исследованию взаимодействия колеса с дорогой. На основании экспериментов автор показывает, каким образом изменяется форма шины при нагружении ее нормальной силой. В указанной работе рассматривается крутильная податливость, изменение формы профиля шины, а также силы и напряжения, возникающие в плоскости контакта и в элементах некатящейся шины при нагружении ее боковой силой. Показано, что касательные напряжения в продольной плоскости имеют обычно синусоидальный характер распределения, а в поперечной - параболический. Они в большей степени зависят от окружных сил, приложенных к колесу и в меньшей степени - от давления воздуха, нагрузки, конструкции шины. Величина касательных напряжений в контакте неподвижного и ведомого колес составляет 0,2...0,25 от значений удельных давлений.

Исследованию распределения удельного давления в контакте шины с основанием посвящена работа И.П.Петрова[32]. В этой работе коронная часть шины, включающая каркас, брекер и протектор, моделируется жесткой в поперечном сечении лентой, связанной с ободом колеса кордными нитями. В результате рассмотрения общего случая взаимодействий шины с поверхностью качения составлены дифференциальные уравнения равновесия коронного элемента модели шины. Полученная таким образом система дифференциальных уравнений описывает взаимодействие шины с дорогой.

В работе Ю.А.Ечеистова[33] колесо в сочетании с осью и дорогой рассматривается как механизм второго ранга. Силовые и кинематические соотношения колеса автор предлагает описывать, по аналогии с гидротрансформатором, при помощи коэффициента трансформации К и передаточного отношения i.

Автор рекомендует применять передаточное отношение i при описании качения ведущего автомобильного колеса, а в случае тормозящего колеса - коэффициент относительного проскальзывания $\delta = (r_k - r_c)/ r_k$, где r_c - радиус качения в свободном режиме, r_k - радиус качения пневмоколеса.

Система «ось-колесо-дорога» рассматривается здесь с учетом идей Рейнольдса о наличии в пятне контакта принятой модели колеса зон сцепления и скольжения.

Форма эпюры нормальных реакций принята с целью упрощения этапов описания процессов качения колеса прямоугольной. Очевидно, что реальные процессы взаимодействия не совпадают с описанными. При такой эпюре нормальных давлений большие различия наблюдаются даже в эпюрах касательных напряжений неподвижного колеса, нагруженного нормальной силой. Описание получилось бы точнее, если бы автор принял эпюру нормальных реакций (удельных давлений), зависящей от конструкции шины и давления воздуха в ней, или, в первом приближении, трапецеидального вида.

Не все исследователи качения придерживаются схемы Рейнольдса. Р.Лоренц[34] считает, что при любой касательной нагрузке скольжение распространяется на всю зону контакта, а удельные касательные силы q_t во всех точках площадки контакта являются пропорциональными нормальным давлениям q_n, т.е. $q_t = \nu q_n$, где ν - коэффициент пропорциональности, зависящий от касательной нагрузки и возрастающий с ее увеличением, достигая в предельном случае величины коэффициента трения. Таким образом, Р.Лоренц предполагает закон распределения касательных напряжений при любой касательной нагрузке таким же, как закон распределения нормальных давлений.

Аналогично Лоренцу Л.Е.Белов[35] также принимает, что проскальзывание имеет место во всех точках контакта шины с поверхностью основания. Применяя схему Лоренца, автор получил зависимости, имеющие смысл лишь в

предельном случае, предшествующем полному буксованию, т.е. когда коэффициент пропорциональности становится равным коэффициенту сцепления шины с дорогой.

Установление аналитической связи между параметрами, оказывающими непосредственное влияние на сопротивление качению колеса с эластичной шиной, является одной из основных задач теории качении пневмоколеса.

Оценочным параметром потерь на качение является коэффициент сопротивления качению или сила, необходимая для перекатывания колеса, или момент сопротивления.

Е.А.Чудаков[36] на основании совместного решения уравнений равновесия и мощностного баланса получил [37] известную формулу для определения коэффициента сопротивления качению пневмоколеса

$$f = \frac{a}{r_\partial} + \frac{M_k}{G_k}\frac{r_k - r_\partial}{r_k r_\partial}$$

где a - плечо сопротивления качению, r_∂ - динамический радиус колеса, $M_к$ - крутящий момент на колесе, $V/\omega = r_k$ - переменная кинематическая передаточная функция, которую он назвал радиусом качения (здесь V - скорость оси колеса, ω – его угловая скорость).

Известно, что сопротивление качению колеса долгое время определялось, исходя из баланса мощности или из силового равновесия колеса, т.е. по формулам вида:

а) из баланса мощностей: $M_f = \frac{P_f}{\omega_k} = M_k - F_x r_k$

б) из силового равновесия колеса: $M_f = Ga = M_k - F_x r_\partial$

где P_f - мощность сопротивления качению колеса, $\omega_к$ - угловая скорость колеса.

Результаты, получаемые по двум последним формулам, как отмечает В.И.Новопольский[38, 39], расходятся существенно по величине. Поэтому их нельзя применять в отдельности при определении сопротивления качению колеса. В.И.Новопольский также высказал мнение, что снос вертикальной реакции относительно физической оси и плечо сопротивления качению не являются тождественными величинами. Тем более, что снос, как это отмечается у Е.А.Чудакова[37] и Н.И.Глаголева[40], может иметь для тормозного качения колеса отрицательные значения, что привело бы к абсурду.

В.А.Петрушов[41, 42] предложил рассматривать смещение вертикальной реакции, состоящим из двух компонентов $b = a + c$, где a - компонент смещения нормальной равнодействующей реакции, возникающее под действием потерь на сопротивление качению; с - компонент смещения нормальной равнодействующей реакции эластичного колеса, возникающее в результате деформаций от горизонтальной силы. Следует отметить оригинальность выведенных В.А.Петрушовым формул и метода проведения анализа сопротивления качению колеса. Сходная точка зрения отражена в работах

Вирабова Р.В. [21, 22], где он выводит также выражения для определения составляющих смещения нормальной реакции основания. Для ведущего нормальная реакция основания смещена относительно середины линии контакта на плечо, равное сумме b_F+b_Γ (оба плеча b_F и b_Γ в этом случае имеют одинаковый знак). Плечо b_F сдвига равнодействующей нормальной реакции основания, возникающее при реализации в контакте касательной силы, находится как $b_f = \frac{F}{F_n}\frac{a^2}{3r_o}$. Плечо b_Γ сдвига нормальной реакции относительно оси колеса, обусловленное несимметричностью эпюры нормальных давлений, возникающей из-за гистерезиса, равно $b_\Gamma = f_0 r_k^c$, где r^c_k – так называемый радиус свободного качения колеса, когда в контакте с основанием отсутствует касательная сила; $f_0 = F_0/F_n$- коэффициент сопротивления качению колеса в ведомом режиме (т.е., когда к колесу не прикладывается тормозной момент и момент сопротивления качению обусловлен только несовершенством упругих свойств колеса, т.е. гистерезисом); F_0 -сила сопротивления качению в ведомом режиме. Величина f_0 определяется опытным путем и известна для большинства шин. В.А.Петрушовым, в частности, была получена [41, 42] эмпирическая формула для определения коэффициента сопротивления качению в ведомом режиме:

$$f_0 = \frac{\alpha + \beta F_n^2}{1 + P_w}$$

Здесь P_w - внутреннее давление воздуха в шинах, α и β - коэффициенты, зависящие от числа слоев корда, ширины и высоты профиля, радиуса колеса.

Для тормозного колеса смещение точки приложения равнодействующей нормальных реакций равно $b_\Gamma - b_F$.

Связь между моментом на колесе и касательной силой имеет вид:

$$M = Fr_k^c.$$

Знак момента - положительный для ведущего и отрицательный для тормозного момента, будет определять и знак действующей в контакте касательной силы.

Сопротивлению качению пневмоколеса посвящены и работы [43, 44]В.И.Кнороза и др. Они предлагают определять сопротивление качению пневмоколеса по петле гистерезиса шины при однократном ее обжатии.

Однако указанный метод, как отмечают сами авторы, разработан еще недостаточно, и он может быть применен лишь для малых скоростей движения. При более высоких скоростях движения он непригоден, так как процесс деформирования шины резко усложняется.

Число работ, посвященных вопросам, связанными с прямолинейным качением эластичных колес по жесткому основанию, не ограничиваются, естественно, вышеуказанным перечнем. Можно привести достаточно большое количество как теоретических, так и экспериментальных исследований [45 – 74], в которых рассматриваются вопросы, связанные с определением КПД

эластичного колеса , потерь при качении, силовых и кинематических параметров колеса.

К числу известных исследований, результаты которых используются в решении ряда задач теории качения, в том числе, которые ставятся в данной работе, относятся работы Вирабова Р.В. [20 – 23].

При этом математическим зависимостям предпослана физическая картина явлений, происходящих в зоне контакта упругих тел при качении, и раскрывающих процесс реализации касательной силы.

В основу анализа берется положение, что тангенциальная деформация является обязательным условием передачи касательной силы упругим телом. Из этого следует, что возникновение касательной силы в зоне контакта возможно лишь при наличии тангенциальных смещений взаимодействующих тел. При установившемся движении вступающие в зону контакта элементы сопряженных тел начинают совместное движение без скольжения, опережая ведомое звено и отставая от ведущего.

Возникающие в контакте тангенциальные смещения обусловливают реализацию неполной силы трения - силы предварительного смещения. В некоторой точке контакта, где удельная касательная сила между сопряженными элементами поверхности для данных коэффициентов трения и нормального давления оказывается предельной, начинается участок скольжения.

Возникающие в контакте вследствие тангенциальной деформации элементов беговой дорожки колеса продольные тангенциальные напряжения многими исследованиями принимаются пропорциональными тангенциальным смещениям U, т.е. $q_t = \lambda U$, где λ - коэффициент тангенциальной жесткости.

Зависимость радиуса качения эластичного колеса от действующей в контакте касательной силы (в линейном диапазоне) с достаточной для практики точностью описывается формулой, предложенной Е.А.Чудаковым: $r_k = r_k^c \pm \gamma_F F$.Представленная зависимость широко используется в практических и теоретических расчетах, в связи с чем возникает задача определения коэффициента эластичности γ_F, чему также посвящено немало работ.

Обширный круг исследований посвящен динамическому взаимодействию колес с реальной дорогой [75...80].

Исследуя этот вопрос, Балабин И.В. [75] отмечает сложность, многофакторность и трудоемкость аналитического решения проблемы качения колеса по реальной дорожной поверхности, на необходимость накопления значительного объема экспериментального материала.

На основании многочисленных экспериментов он, в частности, установил возникновение осевой силы, действующей на колесо при прямолинейном движении по неровной дороге. Значительное число работ в этой области выполнено Кнорозом В.И. и его коллегами.

В работах, посвященных анализу воздействия дисбаланса колеса, в основном исследуется его влияние на вибронагруженность колесной машины (например, [81, 82, 44]). Влияние дисбаланса на сопротивление качению и износ шин остается недостаточно изучено.

В 1921 г. появилась работа Хиткоута[83], в которой раскрывались принципиально новые вопросы, касающиеся износа и сопротивления качению упругих тел при некоторых видах качения. Исследуя работу шарикоподшипников, Хиткоут установил, что при качении шарика по поверхности желоба из-за наличия поперечной кривизны тел в зоне контакта точки шарика удалены от оси вращения на разные расстояния, вследствие чего в контакте возникает микроскольжение элементов соприкасающихся тел. Считая, что касание происходит при отсутствии касательной силы, т.е. является свободным качением, Хиткоут отмечает, что микроскольжение происходит по всей поверхности контакта, кроме двух линий, параллельных скорости качения и расположенных на расстоянии 0,35 В от продольной оси симметрии.

Несколько ранее подобное микроскольжение было описано Пальмгреном[84].

Явление микроскольжения, описанное Пальмгреном и Хиткоутом, было позже рассмотрено Друтовским Р. [8 – 10], Джонсоном К. [85], Пинегиным С.В. [86, 87, 88], Хэллингом[89, 90], Чудаковым Е.А. [91], Вирабовым Р.В. [21, 92, 93] и др.

К.Джонсон в работе [85] приходит к выводу, что при близкой конформности и большой нагрузке сопротивление по Хиткоуту может превышать потери на гистерезис. Зона проскальзывания, полученная Джонсоном, отличается от схемы Хиткоута, считавшего, что проскальзывание распространяется по всем точкам продольных сечений контактного эллипса.

Обширные исследования описанного явления были проведены Пинегиным С.В. [86 – 88]. Проводя опыты с качением шаров и тороидов по желобу и плоскости, Пинегин получил результаты, аналогичные опубликованным в работах Р.Друтовского [8 – 10] и Джонсона [85]. Хеллинг[8, 90] при решении задачи качения шара по желобу, используя теорию бесконечно узких полос, дает приемлемое предсказание физического характера явления «хиткоутского» проскальзывания.

Чудаков Е.А. [88], а позже и Вирабов Р.В. [21, 92], занимаясь вопросами теории качения эластичных колес, также указывают на возможность появления при качении колеса в свободном режиме процессов, аналогичных описанными Пальмгреном и Хиткоутом. При качении колеса окружности с большими радиусами будут проскальзывать по опорной плоскости назад, то есть против движения колеса; окружности с меньшими радиусами - вперед по ходу движения колеса. При этом очевидно средние сечения будут выполнять рольведущих, а крайние - тормозящих. Подобные предположения были

неоднократно подтверждены экспериментально. Например, в [94] при исследовании тангенциальных напряжений, возникающих в контакте пневматической шины с твердым основанием при качении в свободном режиме, для средних сечений получены эпюры распределения напряжений, соответствующие ведущему режиму, а для крайних – тормозному.

Однако вследствие значительной эластичности резинового колеса, отмечает Чудаков Е.А., отдельные элементы шины при качении могут и не скользить по плоскости качения, а лишь деформироваться - сжиматься (на внутренних участках отпечатка) или

растягиваться (на крайних участках). В соответствии с этим качение без скольжения, отмечает автор [91], будет происходить не только в сечениях с $r = r_к$, но и в

близлежащих. Как и Хиткоут, Чудаков Е.А. считал, что проскальзывание будет происходить сразу по всему продольному сечению пятна контакта. Однако эластичность шины изменяет картину зон сцепления и скольжения иным образом. По мере роста упругих деформаций, обусловленных различием окружных скоростей продольных сечений колеса, тангенциальные напряжения очевидно также будут увеличиваться. По достижении тангенциальных напряжений предельных по сцеплению произойдет срыв и элемент поверхности шины начнет скользить по поверхности основания. Таким образом, участки зоны скольжения должны располагаться на задней половине контакта ближе к его краям, а не вдоль всего продольного сечения, как считал Чудаков Е.А.

Открытое Пальмгреном и Хиткоутом явление проскальзывания поверхностей контактирующих тел, при качении, обусловленное тороидальностью формы тел, является сравнительно мало изученным. Несмотря на большой экспериментальный материал, имеются лишь отдельные решения, количественно описывающие этот процесс, которые обнаруживают значительное расхождение с опытными данными. Причем решения этой задачи получены лишь для случая качения стальных шаров по желобу при деформациях, подчиняющихся закону Гука. Качение высокоэластичных тел типа колес с шинами будет иметь очевидно свои особенности: деформации могут достигать значительной величины, колесо - не сплошное однородное тело, большая податливость в окружном и поперечном направлениях изменяют картину распределения тангенциальных напряжений, зон сцепления и скольжения. Вопрос о рациональной форме беговой дорожки протектора особенно актуален для колесных транспортных средств, так как в зависимости от поперечной кривизны протектора, его износ и сопротивление качению будет различным.

В последнее время в автомобильной промышленности стали применяться шины с нулевой и даже обратной кривизной беговой дорожки, позволяющие, как отмечает И.В.Балабин, уменьшить сопротивление качению шины [95] и ее

износ. Однако единой точки зрения о рациональной кривизне беговой дорожки нет. Так, Фортунков Д.Ф. [96], исследуя причины неравномерного износа шин легкового автомобиля, получил, что шины с обратной кривизной снижают износ, но имеют большое сопротивление качению. Авторы [97], принимая, что сопротивление качению снижается с увеличением радиуса кривизны беговой дорожки протектора, отмечают в то же время, что одновременно с этим увеличиваются напряжения в плечевых зонах и несколько уменьшаются в средней части протектора.

Имеются попытки количественно описать явления, обусловленные тороидальной формой поверхности беговой дорожки, при качении колеса с эластичной шиной по жесткому основанию. В [97] при определении работы трения в контакте шины, нагруженной крутящим моментом, предлагается эмпирически полученное выражение для распределения тангенциальных напряжений по ширине беговой дорожки, которым однако можно пользоваться лишь при известных тангенциальных напряжениях в среднем и крайнем продольных сечениях пятна контакта, которые зависят от конструктивных параметров шин, вертикальной нагрузки, от величины крутящего момента. Кроме того, указанное выражение справедливо только для шин, все продольные сечения которых выполняют одну роль (все ведущие или все ведомые).

Таким образом, до сих пор нет математического аппарата, позволяющего выявить, насколько влияет кривизна беговой дорожки эластичного колеса на величину и характер распределения тангенциальных напряжений в контакте, силу и коэффициент сопротивления качению, мощность потерь на трение в контакте, характер износа беговой дорожки по ее ширине.

В.А.Петров опубликовал работу [98], привлекшую внимание специалистов в области качения колес, в который была сделана попытка обосновать новую теорию качения эластичных колес. Несостоятельность этой новой теории убедительно показана в [99].

Одним из факторов, в значительной мере влияющих на силовые и кинематические параметры эластичного колеса, является качение колеса с уводом. Обширный обзор по этому вопросу приводится в монографии А.С.Литвинова[100]. Дополнительно к указанным в [100] многочисленным работам как советских, так и зарубежных исследований, можно привести также работы Д.А.Антонова[101 – 103],В.И.Кнороза, Ю.М.Юрьева и др. [104 – 111]. Несмотря на многочисленность работ в этом направлении, остаются, тем не менее, и «белые пятна». В частности, совершенно не исследован вопрос о влиянии кривизны беговой дорожки колеса на процесс его качения с уводом, а также совместное влияние угла увода и радиуса кривизны траектории движения колеса как для цилиндрического, так и для тороидального колес.

Прямолинейное качение является частным случаем более общего движения - криволинейного. Ни одно колесное транспортное средство не совершает

только прямолинейное движение. Лишь на равнинных загородных шоссе движение колесных транспортных средств можно приближенно считать прямолинейным. В городских и горных условиях сравнительно небольшие прямолинейные участки чередуются с частыми и подчас крутыми поворотами.

Особую актуальность криволинейное движение имеет для внутризаводского колесного транспорта - электрокаров, погрузчиков и т.п. Принимая во внимание тот факт, что внутризаводской подвижный колесный транспорт работает в условиях стесненных цеховых и складских помещений, можно придти к выводу о том, что криволинейное движение занимает большую часть времени движения указанных колесных транспортных средств.

Например, для электропогрузчиков, работающих на погрузочно-разгрузочных работах по схеме склад-вагон, в общем рабочем цикле 68% времени приходится на перемещение электропогрузчика, из которых 56% составляют маневровые операции [112]. В результате многочисленных наблюдений установлено [112], что наибольшее количество маневровых операций осуществляется на поворотах с малыми радиусами.

Исследованию кинематики и динамики криволинейного движения колесных транспортных средств посвящено много работ советских и зарубежных исследователей. Начало исследованию криволинейного движения колесных транспортных средств было положено еще Н.Е.Жуковским. Позже Е.А.Чудаковым и Я.М.Певзнером была разработана теория поворота двухосных колесных машин с передними управляемыми и неведущими колесами. Значительное развитие теория криволинейного движения колесных машин получила в последующих работах Д.А.Антонова, Л.Л.Афанасьева, Ю.А.Брянского, Б.В.Гольда, Г.В.Зимелева. Н.А.Забавникова, Е.Д.Карана, А.С.Литвинова, В.Н.Наумова, Б.С.Фалькевича, Я.Е.Фаробина, И.П.Чайковского и других.

Подавляющее большинство работ в области исследований криволинейного движения посвящено анализу движения колесной машины в целом, при этом рассматривается число осей колесной машины, учитываются ее размеры - база, ширина, являются ли колеса управляемыми или неуправляемыми, исследуется устойчивость и управляемость и т.д., т.е. рассматривается общая теория поворота колесных машин. Однако физические процессы, сопровождающие качение отдельного колеса, и явления в контакте колеса с основанием, влияющие на характер движения колеса, а стало быть и всей колесной машины в целом, изучены сравнительно мало.

В одном из первых трудов по теории криволинейного качения академиком В.М.Келдышем[113] рассматривалось движение колеса на повороте с углом наклона γ к плоскости и углом α поворота плоскости колеса по отношению к средней линии контакта. При этом было принято, что деформация колеса мала, сопротивление качению равно нулю, скольжение элементов поверхности колеса относительно дороги также отсутствует. С учетом указанных

допущений было получено, что движение колеса по криволинейной траектории осуществляется при наличии боковой силы F_yи моментов M_1 и M_2:

$$F_y = a\delta + \sigma G\gamma \qquad M_1 = \sigma G\alpha + gc\gamma \qquad M_2 = b\alpha ,$$

где a, b, σ, g - коэффициенты, определяемые экспериментальным путем.

Позже однако экспериментально было получено, что указанные «уравнения недостаточно отражают физическую сущность явлений, происходящих при криволинейном качении колеса,... и имеют слишком общий характер» [114]. Литвинов А.С. [100, 115] при исследовании кругового движения эластичного колеса установил, что круговое движение возможно лишь при действии на колесо боковой силы, параллельной его оси вращения, и момента верчения M_2 относительно вертикальной оси, проходящей через геометрический центр площадки контакта. Если колесо неподвижно относительно шкворня, то согласно [100, 115] силы и момент, действующие на колесо при криволинейном движении, могут быть выражены уравнениями:

$$F_y = K_y(tg\delta + a/2R) \qquad F_x = (r_k^c - \mathbf{v}/\omega)/K_x \qquad M_z = K_y\chi tg\delta + \frac{b^2}{12}\frac{F_x + r_k^c/K_x}{R + R_ц} ,$$

где:

F_y - боковая составляющая реакции дороги на колесо;

F_x-продольная составляющая реакции дороги на колесо;M_z - момент сопротивления повороту;

R-радиус кривизны траектории центра колеса;

$R_ц$ - радиус поворотной цапфы; δ - угол увода (угол между плоскостью, перпендикулярной оси колеса, и вектором скорости колеса); K_x - коэффициент тангенциальной эластичности шины в продольном направлении; K_y - коэффициент сопротивления уводу; a и b - соответственно полудлина и полуширина площадки контакта.

Кнороз В.И., рассматривая качение автомобильного колеса с наклоном и без наклона по круговой траектории [114], также приходит к выводу о том, что при качении колеса по кругу помимо продольной силы на него действует боковая сила и момент M_z. Со ссылкой на опыты А.С.Литвинова он указывает, что при отсутствии боковой силы движение колеса происходит по спирали. Величины продольной и боковой сил, действующих на колесо, определяются, как:

$$F_x = \frac{\pi}{180}\frac{r_k}{R}\frac{F_y}{K_y C} \qquad F_y = K_y C_1 \frac{a^2}{R} ,$$

где C_1 - поправочный коэффициент. Отметим, что скольжение в зоне контакта с основанием не учитывалось.

В работе [114] описана установка для проверки выведенных зависимостей, полученных из рассмотрения перемещения отпечатка колеса по основанию. Отмечается, что при круговом качении колеса увеличивается коэффициент сопротивления качению и износ шин.

Экспериментальные кривые показывают, что с уменьшением радиуса кривизны траектории движения центра колеса боковая сила увеличивается сначала медленно, затем, по достижении некоторого значения R, происходит резкое увеличение F_y до ее максимального значения, после чего она падает до нуля при R = 0.

Полученные Фройденштайном[116] результаты очень интересны, но, как отмечает и сам автор, дают лишь качественное сходство теоретических и экспериментальных зависимостей. Это объясняется, в частности, теми искусственными упрощениями, которые пришлось вводить автору, а также несовершенством теории Фиала Е. [117], на которую опирался Фройденштайн.

Редчиц В.В., решая задачу о влиянии относительного поворота контактного отпечатка θ движущегося колеса [119] на момент сопротивления повороту, рассматривает случаи, когда имеется прямая зависимость момента относительного поворота от угла θ и боковой силы от угла увода δ. Величина угла относительного поворота отпечатка колеса находят как $\theta = 57.3a / 4R$, где a - длина большой оси контактного отпечатка, приведенного к равновеликому прямоугольнику в (м). С учетом последней формулы момент сопротивления криволинейному движению автор /119/ выражает в виде:

$$M = M_f + M_\theta = Gfr_k / \eta + C_\omega 57.3a / 4R,$$

где η - к.п.д. подшипников ступицы колеса; C_ω - угловая жесткость шины.

Выразив R через ω, мощность потерь на качение колеса можно рассчитать в этом случае, как:

$$P = \frac{V}{270}\left(\frac{Gf}{r} + \frac{2C_\omega \theta^2}{57.3a}\right)$$

Из приведенных выше уравнений, как отмечает Редчиц В.В., следует, что сопротивление качению криволинейной траектории растет не за счет увеличения коэффициента сопротивления качению, а за счет увеличения сопротивления относительному повороту пятна контакта. Сопоставляя далее экспериментальные и теоретические данные, он пришел к выводу, что угол относительного поворота контакта есть не что иное, как угол увода δ при криволинейном движении. На основании этого им сделан вывод о том, что стендовые испытания шины, установленной с некоторым заданным углом увода, можно рассматривать как испытания шины, катящейся по круговой траектории с радиусом кривизны, определяемом как $R = \frac{57.3a}{4\theta}$, если вместоθ подставить δ.

Авторы [120], исследуя зависимость момента сопротивления повороту колеса от радиуса обкатки, на основании теоретических и экспериментальных работ, получили, что зависимость момента сил трения скольжения от радиуса обкатки можно условно разделить на 4 области. В первой области, где все точки отпечатка колеса скользят относительно основания, $M_z = f(R)$ с ростом

величины радиуса обкатки от нуля до половины контактного отпечатка увеличивается. Вовторой области $M_z \approx const$ при

$$\frac{b}{2} \le R\frac{a+2x}{4\theta_B},$$

где a и b - полуоси приведенного к равновеликому прямоугольного отпечатку шины; x - смещение центра обкатки колеса по направлению продольной оси отпечатка от его геометрического центра; θ_B - наименьший угол поворота колес на месте, при котором все точки колеса начинают скользить по опорной поверхности. Величину θ_B предлагается определять по экспериментальной кривой. В среднем, указывается в [120], θ_B = 8° - 12°. Третья область является переходной: здесь имеется зона скольжения элементов колеса в зоне контакта (наружная) и зона упругой деформации (внутренняя). В четвертой области происходит только упругая деформация.

Никулин П.И. [121], занимаясь исследованием и решением задачи о скольжении пневмошины при движении по криволинейной траектории с различными опорными поверхностями, в качестве одного из исходных уравнений при определении силы тяги и коэффициента сопротивления качению использует выражение для расчета коэффициента проскальзывания элемента шины в области контакта с жестким основанием:

$$\theta_i = \theta_0 \frac{x^2 + r_o^2}{r_o^2}\frac{R}{R+y},$$

При определении силы тяги рассматривалось, ввиду сложности решения, только 9 наиболее характерных положений параболы нескользящих элементов (соответствующих ведущему режиму и свободному качению колеса).

С целью упрощения при расчете силы тяги принималось, что нормальное давление по площади контакта распределено равномерно, а коэффициент трения - зависит от проскальзывания.

Экспериментальное исследование и определение коэффициента сопротивления качению определялись Никулиным П.И. для режима свободного качения. В этом случае F_x = 0, определялась величина и подсчитывался момент, подводимый к колесу, а затем и величина f_c. Боковое скольжение не учитывалось. Этим, как объясняет автор, и определяется, по-видимому, несовпадение теоретической и экспериментальной зависимости f = f(R) на малых радиусах поворота, где расхождение достигало 18%.

Несмотря на определенные достоинства указанной работы, следует отметить, что полученное автором уравнение нескользящих элементов противоречит установленному многочисленными теоретическими и экспериментальными исследованиями факту о делении

площадки контакта колеса с основанием на зону сцепления, расположенную со стороны набегания колеса, и зону скольжения на выходе из контакта.

Кроме того, в работе не исследовался ведомый режим качения, а выведенными зависимостями можно пользоваться только для режима

свободного качения, т.к. величину входящего во все уравнения коэффициента проскальзывания центральной опорной точки шины можно найти, лишь полагая $F_x = 0$.

Существенное снижение точности решения обуславливает также принятие равномерного распределения нормального давления по площади контакта и особенно - пренебрежение поперечным проскальзыванием элементов шины относительно основания.

Джапаридзе Т.Н. [122] при определении силы сопротивления движению колес автомобиля на повороте считает, что скорости проскальзывания двух симметричных относительно продольной оси сечений колеса равны $V_{ск1} = \Omega(R + 0.5b) - \omega r; V_{ск2} = \Omega(R - 0.5b) - \omega r$.

Отсюда можно придти к выводу о том, что нескользящим является среднее продольное сечение колеса.

Как и другие авторы, Джапаридзе Т.Н. отмечает значительное увеличение сопротивления качению на криволинейном участке, объясняя это качением элементов шины с разными радиусами в контактной площадке (при V до 5 км/час).

Стоянов С. и Георгиев Г. [123] работу сил сопротивления при качении колеса по круговой траектории раскладывают на две составляющие - работу при прямолинейном качении на пути, равном длине дуге , и работу сил трения скольжения в контакте при повороте колеса на угол α, опирающийся на эту дугу, вокруг своей вертикальной оси. Деформация колеса в продольном и поперечном направлениях не учитывалась, а нормальное давление принимается распределенным равномерно по площадке контакта.

Широкое применение в грузоподъемных механизмах находят опорно-поворотные устройства на цилиндрических и конических роликах. Цилиндрические катки, отмечается в [124], при качении по опорному рельсу имеют постоянное проскальзывание, обусловленное поворотом оси катка в горизонтальной плоскости.

При определении сопротивления движению опорно-поворотного устройства авторы [124], как и в [123], суммируют сопротивление качению катков на «спрямленном участке» кругового рельса и сопротивление скольжения катков по рельсу при их относительном повороте.

Аналогичной точки зрения придерживается и Каран Е.Д. [125]. Исследуя криволинейное движение пневмоколеса по деформируемому грунту, он вводит понятие

приведенного момента сопротивления качению, который обусловлен поворотом контактного отпечатка вокруг своей оси $M_{пов}^{прив} = M_{пов} r_c / R$, где R - радиус поворота колеса, r_c - силовой радиус колеса, $M_{пов}$ - поворачивающий момент, действующий в горизонтальной плоскости, который автор [125] считает не зависящим от радиуса кривизны траектории. Приближенное

значение $M_{пов}$ определяется по формуле $M_{пов} \approx \frac{\pi}{2}\lambda^2\sigma\varphi D^3$, где D - диаметр приведенного круга (отпечатка), σ - среднее удельное давление, φ - коэффициент трения, λ - коэффициент, зависящий от отношения размеров приведенного круга и реального пятна контакта.

С учетом деформативных свойств грунта Каран Е.Д. рассматривает также зависимость боковой силы и момента сопротивления качению от углов увода колеса, не учитывая тангенциальную деформацию колеса.

Исследованием криволинейного движения колеса по деформируемому грунту занимались также А.Ф.Полетаев и Ю.А.Ганькин[126]. Как и в приведенных выше работах, движения колеса на повороте они раскладывали на составляющие - поступательное и вращательное вокруг центра отпечатка. При этом действительная форма отпечатка колеса заменялась прямоугольной, а удельное давление в контакте принималось равномерным.

Н.А.Забавников и В.Н.Наумов с коллегами [127], исследуя процесс взаимодействия жесткого колеса с грунтом при бортовом повороте колесной машины, вывели систему интегральных уравнений, позволяющих определять силы и моменты на колесах. Но все же сложные функции в виде двойных интегралов затрудняют их практическое использование.

Последующая работа В.Н.Наумова и Б.П.Назаренко[128] также интересна, отличается оригинальностью и достаточна удобна для применения.

Филлипс А. [129], анализируя процесс возникновения в контакте криволинейно движущегося колеса сил и моментов, пришел к выводу о том, что, если на колесо действует продольная тормозная сила, то она будет создавать момент вокруг центра контакта, направление которого будет противоположно направлению момента от боковой силы, т.е. тормозное усилие уменьшает общий стабилизирующий момент.Если же на шину действует движущая сила, то стабилизирующий момент увеличивается, причем при действии значительной продольной силы величина боковой силы уменьшается, что приводит к уменьшению стабилизирующего момента.

Таким образом, анализ работ по криволинейному качению эластичных колес показывает, что в приведенных до настоящего времени исследованиях по-разному, зачастую ограничено и противоречиво, представляются физические явления при криволинейном качении эластичных колес. В одних работах не учитывается боковая сила, в других - продольная, в третьих - момент сопротивления повороту; практически все исследования не учитывают истинный характер распределения нормальных давлений по площадке контакта; ни в одной работе не исследуется влияние формы беговой дорожки колеса на процесс его криволинейного качения; даже наиболее комплексные теоретические работы содержат выражения, в которые входят поправочные коэффициенты, а также невыявленные параметры (например, радиус качения r_k или угловая скорость ω колеса).

К числу вопросов, на которые нет однозначного ответа, относится и вопрос об оптимальном соотношении углов установки управляемых колес.

Ю.А.Ечеистов и М.М.Слуцкин , рассматривая влияние углов установки управляемых колес на сопротивление прямолинейному движению автомобиля, выводят формулу $\delta = \alpha K_\delta / 2K_\alpha$ для расчета силы сопротивления движению, обусловленной наличием углов развала и схождения, из которой находят оптимальное (с точки зрения минимального сопротивления движению) значение угла схождения δ_0 для данного угла развала α. В этой формуле K_δ и K_α- постоянные коэффициенты, определяемые опытным путем. Движение автомобиля на повороте не рассматривалось, хотя можно предположить, что в этом случае соотношение углов развала и увода будет иным, зависящим от радиуса поворота. Не рассматривается также совместное влияние углов установки и радиуса поворота на возникающую в контакте боковую силу, момент сопротивления повороту, износ шин.

В.В.Редчиц с коллегами, развивая выполненные ранее исследования [119], приходит к выводу о том, что угол схождения должен быть примерно в 4 раза меньше угла развала (чтобы колесо катилось без дополнительного сопротивления, создаваемого моментом от поворота отпечатка шины при криволинейном качении со схождением). Однако, очевидно, что на разных радиусах поворота это соотношение должно меняться. Боковая сила, износ шин не рассматривались.

Таким образом, вопрос об оптимальном (с точки зрения минимальной боковой силы, момента сопротивления повороту, износа шин) соотношении углов увода и развала как при криволинейном, так и при прямолинейном движении остается открытым.

Качение автомобиля, установленного на барабанном стенде (например, при обкаточных или диагностических испытаниях), отличается от качения по дороге, и в первую очередь - вследствии особенностей работы эластичных колес.

Силовое воздействие колеса с одним или двумя беговыми барабанами диагностических стендов рассматривается в ряде работ [130, 131, 132].

При этом при нахождении сил и моментов принимается точечный контакт колеса с барабаном, что, конечно, является чрезмерным упрощением. В [132] при рассмотрении тяговых испытаний на барабанном стенде учитывается различное возможное положение барабанов секции и их режимы вращения (ведущий или тормозной). Однако силой сопротивления качения пренебрегают, считая ее малой. Это противоречит данным, приводимым в [130].

При работе автомобиля на барабанном стенде имеет место повышенное сопротивление качению колес, обусловленное большими гистерезисными потерями в материале шины (из-за больших радиальных деформаций шины) и повышенным проскальзыванием элементов беговой дорожки колеса по

поверхности барабана. Кроме того, при воздействии дополнительного тормозного момента на барабанах с целью создания условий, эквивалентных обкатке на дороге, изменяются кинематические и силовые характеристики колеса.

Экспериментальным путем установлено, что на стенде с беговыми барабанами коэффициент сопротивления качению изменяется в пределах 0,026...0,028.

Л.И.Коротков[133], рассматривая схему сил, действующих на колесо, установленное на несимметрично расположенных барабанах равного диаметра, выводит формулу для определения коэффициента сопротивления качению колеса по криволинейной поверхности $f' = f + tg\left[\arcsin(f - \frac{r_k}{r_\delta})\right]$, где f - коэффициент сопротивления качению по гладкой плоской поверхности из того же материала, что и поверхность барабана.

Величину коэффициента сопротивления качению он проверял экспериментально на специальном стенде с тремя парами стальных симметрично расположенных сменных барабанов разных диаметров для получения большего диапазона соотношений r_δ/r_k. Привод стенда - от электродвигателя постоянного тока через ременную передачу. Колесо вращалось в ведомом режиме со скоростью V = 35 км/час. Испытания проводили при различных межцентровых расстояниях между барабанами, разных давлениях воздуха в шинах и весовой нагрузке на колесо. Весовая нагрузка создавалась пружинными динамометрами. При проведении экспериментов определяли частоту вращения барабанов, мощность, теряемую на трение в узлах стенда, и мощность, затрачиваемую на привод всей установки с испытываемым колесом. Мощность измеряли ваттметром с учетом КПД электродвигателя.

Автор [133] отмечает, что точность определения коэффициента сопротивления качению этим методом выше, чем методом выбега.

Из приводимых в [133] графиков видно, что при номинальном давлении воздуха в шинах и соотношении d_δ/d_k = 0,4...0,8 коэффициент сопротивления качению по барабанам f' в 2,2...3,9 раза больше, чем по аналогичной плоской поверхности. Разница между теоретическим и экспериментальным значениями f' возрастает с уменьшением d_δ/d_k, что объясняется некоторым увеличением потерь на проскальзывание при меньших диаметрах барабанов.

С увеличением межосевого расстояния между барабанами, скорости качения и с уменьшением давления воздуха в шине коэффициент сопротивления качению возрастает.

Н.К.Куликов[134] предлагает следующую зависимость для величины коэффициента, показывающего, во сколько раз сила сопротивления качению на

барабане больше силы сопротивления качению на плоской горизонтальной дороге $n = (1 + \frac{r}{r_\delta})^2$, где r - радиус колеса в свободном состоянии.

Приведенная зависимость справедлива в случае, если $r/r_\delta << 1$ и деформация колеса незначительна. Эту зависимость нельзя применять при рассмотрении вопроса взаимодействия тяжелонагруженных шин низкого давления с недеформируемой опорной поверхностью

Ю.П.Борозняк[135, 136] предложил метод определения силы сопротивления качению колес машин по дороге по ее величине при качении колес на поверхности беговых барабанов стенда. Величина силы сопротивления качению ведомого колеса по твердой поверхности, как считает Ю.П.Борозняк, обусловлена в основном потерями на внутреннее трение в шине, потери же на трение скольжения и контакте невелики, поэтому ими он пренебрегает. Гистерезисные потери возникают при всех видах деформации шин, однако основная величина гистерезисных потерь ведомого колеса определяется нормальной деформацией, так как все другие виды деформации и связанные с ними гистерезисные потери зависят от нормальной деформации.

Рассмотрев работу трения в шине за один оборот колеса на дороге и на барабане, Ю.П.Борозняк определяет коэффициент П несоответствия силы сопротивления качению колес по барабанам и по дороге и силу сопротивления качению колес машин по недеформируемой дорожной поверхности: $F_{f_{0a}} = F_{f_{0\delta}} П$.

Результаты расчета по предложенной Ю.П.Борозняком методике проверялись экспериментально для трактора Т-125 на стенде с беговыми барабанами и на дороге.

Бухин Б.Л. [137], рассматривая качение ведомого колеса по жесткому барабану, получает, что сила сопротивления качению в этом случае равна: $F_f = F_x(1 + \frac{r_\partial}{r_\delta})$, где $r_\partial + r_\delta$ - расстояние между осью колеса и осью барабана; F_x - сила, действующая на ось ведомого колеса.

Ссылаясь на [138], он приводит следующее соотношение между коэффициентами сопротивления качению на плоскости и цилиндрической поверхности:

$$f_\delta = f\sqrt{1 + \frac{r}{r_\delta}}$$

Таким образом, анализ исследований, посвященных работе эластичных колес на барабанных стендах, показал, что до сих пор ряд вопросов, связанных с определением кинематических и силовых параметров колеса при его качении по жесткому барабану остается невыясненным или требует уточнения. К их числу относятся такие, как определение относительного проскальзывания в контакте и определяемой им мощности, затрачиваемой на качение, плеча сдвига точки приложения нормальной реакции относительно оси колеса, сопротивление качению.

Неопределенность в этих вопросах затрудняет задачу рассмотрения работы автомобиля на барабанном стенде, в том числе - определение влияния эластичных свойств шин и конструкции автомобиля на распределение сил и моментов по мостам автомобиля, на мощность, затрачиваемую на качение автомобиля по барабанам стенда.

Наконец, неясно, каким образом следует определять нагрузочный режим при обкаточных испытаниях автомобиля на стенде и какова должна быть их продолжительность, чтобы обкаточные испытания на стенде были эквивалентны по выявляемости дефектов обкаточным испытаниям на дороге.

Характерной особенностью большинства полноприводных автомобилей, колесных землеройных машин и тракторов является их работа на деформируемых грунтах. Это обуславливает необходимость рассмотрения особенностей взаимодействия эластичных колес с грунтом, в том числе таких вопросов, как глубина колеи и мощность потерь на колееобразование, движение колеса по проложенной колее, качение с уводом, силы и момент, действующие на колесо, влияние параметров колеса и режима качения и т.д.

Затраты мощности на качение колеса по деформируемому грунту в значительной мере зависят от глубины погружения колеса в грунт и от физико-механических свойств грунта. Это заставляет исследователей искать удобную для последующих вычислений модель деформирования грунта, основываясь, в частности, на исследованиях в области механики грунтов [139 – 143]. Наиболее широкое распространение получила зависимость Берштейна-Летошнева [144]: $q = CH^m$, где q - сопротивление грунта вдавливанию, C - удельное сопротивление грунта вдавливанию на глубину 1 см, H - глубина вдавливания, m - показатель степени. Подобная зависимость используется, например, в работах Горячкина В.П. [145], Бабкова В.Ф., Бируля А.К., Сиденко В.М. [141], Ляско М.И. [146], Гребенщикова В.И. [147], Пирковского Ю.В. и Чистова М.П. [148, 149, 150], Добромирова В.Н. [151], Наумова В.Н., Рождественского Ю.Л. [127, 152, 153 и других.

Указанная формула отличается простотой и, как следствие, удобством в вычислениях, хотя и не отражает в достаточной степени реальную картину взаимодействия колеса-штампа с грунтом. Это побуждает исследователей вносить уточнения в формулу, как, например, это делает Беккер М.Г. [140], вводя дополнительные коэффициенты, учитывающие размеры штампа. Однако большое разнообразие форм процесса сжатия грунта не дает возможности выразить функциональную связь между нагрузкой и осадкой в виде логической зависимости, что обусловило появление и других уравнений: Агейкина Я.С. [154, 155, 156, 188], Кошарного С.Ф. [157, 158], Полетаева А.Ф. [159], Гуськова В.В. [160], Кацыгина В.В., Орды А. [161, 162, 163], Водяника И.И. [164, 63], Золотаревский Д.И. [165, 166] и т.д. Анализ различных математических моделей вдавливания колеса в грунт дается, в частности, в работах Кошарного Н.Ф. [157] и Скотникова В.А., Пономарева А.В., Климанова А.В. [283].

Ряд исследований [67, 166...172] в своих моделях учитывает вязкоупругие свойства системы грунт-колесо, однако используемые при этом зависимости приводят к сложным выражениям, затрудняющим их практическое использование, и к тому же требуют большего количества экспериментально получаемых данных.

При качении пневмоколеса с высоким внутренним давлением воздуха по деформируемому грунту характер взаимодействия колес с грунтом таков, что колесо можно считать жестким, поскольку его нормальная деформация мала. Это существенно упрощает расчеты, связанные с анализом работы колесных машин, что было использовано, в частности, Пирковским Ю.В. [173], Бабковым Б.Ф. [142], Говорущенко Н.Я. [174], Полетаевым А.Ф. [159], Беккером М.Г. [140], Дж.Вонгом[143] и другими.

Тем не менее следует иметь в виду, что для пневмоколес со сниженным давлением воздуха в них (как у полноприводных автомобилей с регулируемым давлением воздуха в шинах) или для шин низкого давления (которыми оборудуются сельскохозяйственные колесные тракторы и прицепы) указанное упрощение не отражает реального характера взаимодействия колеса с грунтом, приводя к существенным погрешностям в расчетах.

Для устранения этого недостатка было предложено [141, 143] реально деформированное колесо заменять эквивалентным жестким большего диаметра, прокладывающим колею такой же глубины. Подобная модель колеса использовалась также, например, Пирковским Ю.В. и Чистовым М.П. [173, 150].

Тарасов В.Н. [165], ссылаясь на работы БабковаВ.ф. [176] и Ульянова Н.А. [177], использует модель, у которой на передней части контакта колеса с грунтом используется увеличенный эквивалентный радиус одного размера, а на задней части контакта - эквивалентный радиус меньшей величины.

В ряде работ [152, 154, 157, 159, 178-180] при анализе процесса взаимодействия деформируемого колеса с деформируемым грунтом полагают, что контакт колеса с грунтом делится на два участка - плоский (в средней и задней частях) и криволинейный (в передней части). Плоская часть чаще всего рассматривается горизонтальной, однако есть работы, например, Кошарного Н.Ф. [157], в которых учитывается наклон плоской части, зависящий от режима работы колеса.

Криволинейная часть контакта в работах Полетаева А.Ф. [159], Чистова М.П. [180], Агейкина Я.С. [144] представляется цилиндрической с радиусом, равным свободному радиусу колеса; Кошарный Н.Ф. [157] представляет ее параболической, а Рождественский Ю.Л. и Наумов В.Н. [152] - экспоненциальной кривой.

Опубликованные В.И.Кнорозом, А.М.Хлебниковым и И.П.Петровым[181] результаты исследований взаимодействия колес с грунтом показывают, что с увеличением давления воздуха в шине можно с достаточной степенью

точности использовать первую модель. Однако с уменьшением давления воздуха в шине, что подтверждает и работа А.Л.Маршака[182], передняя криволинейная часть контакта увеличивается, приближаясь к средней части контакта. Поэтому вполне обоснованно В.М.Семенов и Р.Г.Армадеров[178], ссылаясь, в частности, на В.С.Ламовицкого[183] и Я.С.Агейкина[154, 156], принимают, что криволинейная часть контакта распространяется до линии, лежащей в вертикальной плоскости, проведенной через ось колеса.

Решение задачи о взаимодействии колеса с грунтом невозможно без знаний физико-механических свойств грунта, поэтому, естественно, многие исследователи процесса качения колес по грунтам занимались и определением параметров грунта - констант, характеризующих нормальные и сдвиговые деформации грунта, например, [184, 185, 186].

В литературе отмечается, что физико-механические свойства грунтов зависят от многих факторов, в том числе от вида грунта, его влажности, степени уплотнения; оказывают определенное влияние также способ измерения, размеры измерительных устройств, их конструкция. Подробное описание вопросов, связанных с определением физико-механических свойств грунтов, дается в [140, 186, 187].

Отметим также, что ввиду многообразия формул, применяемых для описания нормальной и сдвиговой деформаций грунта (см., например, [157]), практически каждая из них требует определения своих специфических констант грунта, и чем сложнее формула, тем, как правило, большее число констант требуется.

В связи с этим небезосновательным представляется решение авторов [188] об использовании в расчетах осредненных значениях параметров грунта, которые получены на основании большого количества выполненных экспериментов.

Обычно по неуплотненному грунту (целине), для которого определяются характеристики, движутся лишь колеса первой оси, последующие катятся по колее с уплотненным грунтом, параметры которого меняются. Это вынуждает исследователей вносить поправки в параметры грунта для каждого последующего прохода колеса.

Например, В.В.Кацыгин и А.Н.Орда[162] при рассмотрении взаимодействия тракторных шин с деформируемым грунтом используют зависимости, определяющие напряжение и деформации при сжатии грунта в зависимости от числа проходов.

Р.Ш.Хабатов, Д.И.Золотаревская, В.Т.Ходыкин[189] предлагают зависимость для определения изменения плотности почвы прохода тракторных колес, однако, как отмечается в [151], ввиду своей линейности она приемлема только для ограниченного круга почв, характерных для тракторов и сельхозмашин.

В работах Безбородовой Г.Б. и Кошарного Н.Ф. [190], Кошарного Н.Ф. [157, 158] также решается рассматриваемая задача, однако необходимость использования эмпирических коэффициентов ограничивает практическое применение предлагаемых зависимостей. Среди исследований, посвященных этому вопросу, можно выделить также работы Ксеневича И.П., Скотникова В.А. [191], Беккера М.Г. [140].

На наш взгляд, наиболее удобную методику предложил Ю.В.Пирковский[173] - удельное сопротивление грунта вдавливанию C_i (в формуле Бернштейна-Летошнева $q_i = C_i H^m$) численно равно произведению значения C_{i-1} при предыдущем проходе колеса на величину приращения глубины, т.е. $C_1 = C$, $C_2 = C_1 H_1$, $C_3 = C_2 H_2 = C_1 H_1 H_2$ и т.д. При этом значение коэффициента m считается постоянной.

Следует отметить, что вообще решения задачи о последовательных проходах колеса «привязаны» к исходным моделям погружения колеса в грунт, что и предопределяет степень их сложности.

В общем случае колеса могут двигаться не «след в след» точно по проложенной колее, а с некоторым боковым смещением. Такое движение рассматривалось А.В.Островцевым[192, 193] и В.Н.Добромировым[151], однако полученные решения сложны и нуждаются в дальнейшей разработке.

К числу других недостаточно проработанных вопросов движения колеса по деформируемому грунту относится вопрос о качении колеса с уводом. Количество опубликованных работ по этой теме незначительно. Я.С.Агейкин[187] приводит довольно сложный вывод расчетных зависимостей, требующих определения ряда эмпирических коэффициентов.

А.М.Кривицкий[194] для нахождения суммарного коэффициента сопротивления боковому уводу использует уравнения Я.С.Агейкина, а боковые составляющие реакции грунта определяет с использованием зависимости В.В.Кацыгина, приняв при этом линейный характер изменения боковой деформации грунта по длине контакта. А.Н.Площаднов[195] выводит зависимость для определения боковой реакции основания, для использования которой также требуется определение достаточно большого количества эмпирических величин.

Еще в меньшей степени исследовано криволинейное движение эластичного колеса по деформируемому грунту. О некоторых из них, например, работах Н.А.Забавникова, В.Н.Наумова и других [127, 128, 196, 125, 126] упоминалось выше.

Значительное количество указанных работ, а также ряд других [153, 197-199], посвящено определению радиусов качения и буксования колес на деформируемом грунте, поскольку эти величины входят, как правило, в уравнения, позволяющие определять силовые параметры колесных движителей и тягово-динамические показатели колесной машины в целом. При этом имеет место большое многообразие решений ввиду различных исходных

моделей взаимодействия колес с грунтом; подавляющее число этих решений имеет громоздкий, трудновоспринимаемый вид.

Следует выделить также работы, выполненные Н.Ф.Бочаровым и др. [200...203], посвященные качению пневмокатков.

Таким образом, анализ опубликованных исследований позволяет определить направления перспективных исследований в области механики качения колес (с точки зрения энергозатрат на качение и силовых параметров колеса):

1. Обобщение основополагающих вопросов взаимодействия эластичного колеса с жесткой опорной поверхностью.
2. Влияние углов установки колес на сопротивление качению.
3. Кинематика и механика криволинейного качения колеса.
4. Особенности качения эластичных тороидальных колес.
5. Определение силовых и кинематических характеристик эластичного колеса при качении по жестким барабанам.
6. Механика взаимодействия колеса с деформируемой поверхностью.
7. Влияние конструктивных параметров колес, условий их качения и конструктивных особенностей колесных машин на износ шин.
8. Приложение механики качения колеса к задачам анализа работы и конструкции колесных машин.

Решению этих задач посвящены, в частности, работы А.Н.Мамаева и других:[204,205,206,207,208,209,210,211,212и др.].

Список использованной литературы

1. Tomlinson O.A. Molecular Theorie of Friction. Phil. Mag., vol. 7, 1929.
2. Ахматов А.С. Проблема граничного трения. В сб. «Развитие теории трения и изнашивания». Тр. совещания по вопросам теории и изнашивания. - Изд. АН СССР, М., 1957.
3. Силин А.А. Трение и его роль в развитии техники. - М., 1976.
4. Дерягин Б.В. Что такое трение. - М., 1963.
5. Конвисаров Д.В., Покровская А.А. Влияние радиусов кривизны цилиндрических тел на их сопротивление перекатыванию при различных нагрузках. - Тр. Сиб. физ.-техн. института. Вып. 54. - Томск, 1955.
6. Конвисаров Д.В. К теории качения. - Доклады АН СССР, т.83, № 3, 1952.
7. Боуден Ф., Тейбор Д. Трение и смазка твердых тел. - М., 1968.
8. Друтовский Р. Контактные напряжения и деформации, возникающие при качении шара. - Тр. амер.общ. инженеров-механиков, сер.Д, т.83, №2, 1961.
9. Друтовский Р. Роль микроскольжения при свободном качении тел. - Тр. амер. общ. инженеров-механиков, сер.Д, т.87, №3, 1965.
10. Drutoweki R. Energy Losses of Balls Rolling on Plates. Trans. of ASME, ser. D, vol. 81, № 2, 1959.
11. Алепин Е.А. Определение мощности двигателя механизма передвижения для машин безрельсового транспорта. - Электротехническая промышленность,

сер. «Тяговое и подъемно-транспортное электрооборудование». - М., 1970, вып. 2, с. 6-8.

12. Fromm H. Berechnung desSchlupfesbeinRollendeformierbarenScheiben. Z.f.Angew. Math. und Mech. Bd. 7, H.I, 1927.

13. Fromm H. VorgangebeimreinenRollenelastischerReibungsrader. VDJ, ¹ 3, 1927.

14. Fromm H. Arbeitsverlust, Formanderungen und SchlupfbeinRollen von treibenden und gebremstenRadernoderScheiben. BeitragzurAnalyse der Reibungsgesetze. Z.f. technischePhysik, ¹9, 1928.

15. Poritski H. Stresses and Deflections of CylindrucalSodies in Contact with Application to Contact and of Locomotive Wheels. Journal of Applied Mechanics, vol. 17, ¹ 2, 1950.

16. Глаголев Н.И. Исследование взаимодействия колес и рельсов и некоторых связанных с ними явлений. - Докторская диссертация, 1947.

17. Ишлинский А.Ю. Теория сопротивления перекатыванию (трение качения) и смежных явлений. - В кн. «Всесоюзная конференция по трению и износу на машинах», т.2, М.-Л., АН СССР, 1940, с.225-265.

18. Ишлинский А.Ю. О проскальзывании в области контакта при трении качения. - Известия АН СССР, отдел технических наук, № 6, 1956.

19. Литвинов А.С. О причинах потери мощности при качении ведущего колеса. - Автомоб.пром., 1972, № 5, с. 12-16.

20. Вирабов Р.В. О реализации касательной силы в зоне контакта упругих тел при качении. - Машиностроение, 1967. - № 2.

21. Вирабов Р.В. Качение упругого колеса по жесткому основанию. - Изв. ВУЗов, Машиностроение, 1967. - № 4. - с.78-85.

22. Вирабов Р.В. Об оценке сопротивления качению упругого колеса по жесткому основанию. - Изв. ВУЗов, Машиностроение, №7, 1967.

23. Вирабов Р.В. Определение радиусов качения колеса с пневматической шиной. - Автомобильная промышленность, 1975, №7.

24. Reynolds O. On the efficiency belts on Straps as communicators of work. Engineers, nov. 27, 1874.

25. Reynolds O. On Rolling-Friction. Roy. Soc. Phil. Trans., v. 166 (pI), 1876.

26. Петров Э.В. Влияние конструктивных параметров массивных резиновых шин на сопротивление качению ведомого колеса. - Изв. ВУЗов, Машиностроение, 1974, №1, с.102-105.

27. Петров Э.В. Радиус качения ведомого цилиндрического колеса с массивной резиновой шиной. - Изв.ВУЗов, Машиностроение, 1972, №2, с.114-117.

28. Петров Э.В. Сопротивление качению ведомого колеса с массивной резиновой шиной. Изв.ВУЗов, Машиностроение, 1975, №1, с.116-119.

29. Станкевич Э.Б. Исследование тяговых свойств и износа шин. - Автореферат кандидатской диссертации. - М., 1969.

30. Кленников Е.В. Исследование влияния некоторых эксплуатационных факторов на распределение напряжений в контакте и износ шины. - Автореферат кандидатской диссертации. - М., 1969 - МАДИ.

31. Кнороз В.И. Исследование рабочего процесса шин и колес и влияние их на топливную экономичность и проходимость автомобиля. - Автореферат докторской диссертации. - М., 1972.

32. Петров И.П. Исследование сцепления колеса с твердой опорной поверхностью. - Автореферат кандидатской диссертации. - М., 1965.

33. Ечеистов Ю.А. Исследование некоторых эксплуатационных качеств автомобиля с учетом преобразующих свойств его шин. - Автореферат докторской диссертации. - М., 1973.

34. Lorenz R. Schiene und Rad. VDJ-Z, 2, №6, 1928.

35. Белов Л.Е. Исследование проскальзывания ведущего колеса с пневматической шиной в области контакта. - Кандидатская диссертация. - ВИСИ, Воронеж, 1972.

36. Чудаков Е.А. Качение автомобильного колеса. - М., Машгиз, 1947, с.72.

37. Чудаков Е.А. Теория автомобиля. - М., Машгиз, 1950, с.344.

38. Новопольский В.И. Экспериментальное исследование потерь на качение автомобильного колеса. - Автомобильная и тракторная промышленность, 1954, №1, с.17-20.

39. Новопольский В.И. Исследование потерь на качение автомобильных шин при различных режимах движения. - Кандидатская диссертация. -1952.

40. Глаголев Н.И. Сопротивление перекатыванию цилиндрических тел. Прикладная математика и механика. Т.9. М.-Л., АН СССР, 1945, с.318-333.

41. Петрушов В.А. Обобщенный метод расчета сопротивлений качению автомобилей и автопоездов с различными типами приводов по твердой поверхности. - Диссертация на соискание ученой степени доктора технических наук. - М., 1969.

42. Петрушов В.А., Щуклин С.А., Москвин В.В. Сопротивление качению автомобилей и автопоездов. - М., Машиностроение, 1975.

43. Кнороз В.И., Кленников Е.В., Петров И.П., Шелухин А.С., Юрьев Ю.М. Работа автомобильной шины. - М., Транспорт, 1976.

44. Кнороз В.И., Кленников Е.В. Шины и колеса. - М., Машиностроение, 1975.

45. Бидерман В.Л., Бочаров Н.Ф., Пугин В.А., Горская Л.П. Исследование потерь на качение в протекторе при свободном качении шины. Изв. ВЗУов, Машиностроение, 1971, №5, с.137-141.

46. Бидерман В.Л., Бочаров Н.Ф., Пугин В.А., Горская Л.П. Дополнительные потери в протекторе при передаче шиной момента и боковых нагрузок. - Изв. ВУЗов, Машиностроение, 1971, №6, с.125-129.

47. Клочков Б.И. Исследование КПД и буксования автомобильного колеса. - Изв. ВУЗов, Машиностроение, 1961, №4, с.154-160.

48. Филюшкин А.В., Бочаров Н.Ф., Семенов В.М., Пугин П.П. Потери при качении шин 14, 00-20 по твердой дороге. - Изв.ВУЗов, Машиностроение, 1964, №7, с.143-146.

49. Бочаров Н.Ф. Определение потерь при качении пневмокатков в зависимости от окружной эластичности резино-кордной оболочки. - Изв. ВУЗов, Машиностроение, 1964, №8, с.97-106.

50. Погосбеков М.И. К определению КПД ведущего колеса автомобиля. - Автомоб.пром., 1961, №9, с.31-32.

51. Петрушов В.А. К вопросу о качении эластичного колеса по твердой опорной поверхности. - Автомоб.пром., 1963, №12, с.5-9.

52. Пирковский Ю.В. Теоретическое и экспериментальное определение коэффициента полезного действия колеса. - Труды НИИ-21, 1962, №11.

53. Пирковский Ю.В. Расчетное определение силы и коэффициента сопротивления качению ведущего колеса с эластичной шиной. - Триды НИИ-21, 1963, №4.

54. Пирковский Ю.В. Некоторые вопросы качения автомобильного колеса. - Автомоб.пром., 1965, №12, с.20-26.

55. Аксенов П.В., Поляков А.С., КПД колеса. - Труды НИИ-21, 1966, сб.2.

56. Купцов В.М. Тангенциальная деформация и скольжение пневматической шины. - Автомоб.пром., 1970, №2, с.26-29.

57. Ечеистов Ю.А., Семов Д.С. Силовые соотношения автомобильного колеса, прямолинейно катящегося по твердой дороге. - Автомоб.пром., 1973, №12, с.18-19.

58. Князьков В.Н., Кленников Е.В. Исследование работы пневматической шины под действием нормальной нагрузки. - Автомоб.пром., 1975, №10, с.24-27.

59. Коновалов В.В., Гусев В.И., Бочаров Н.Ф., Митрофанов В.И. Влияние скорости качения на демпфирующие свойства шин. - Автомоб.пром., 1976, №12, с.9-11.

60. Суровегин Ю.В. О скольжениях и потерях мощности в зоне контакта крупногабаритных шин с опорной поверхностью. - Автомоб.пром., 1976, №6, с.19-20.

61. Евграфов А.Н., Петрушов В.А., Московкин В.В., Бычков В.И. Расчет нормальной жесткости шин для оценки их эксплуатационных показателей. - Автомоб.пром., 1977, №1, с.20-22.

62. Водяник И.И. О продольных напряжениях, возникающих при контакте пневматической шины с дорогой. - Автомоб.пром., 1977, №7, с.29-30.

63. Водяник И.И. Выбор моделей для аналитического описания взаимодействия пневматической шины с дорогой. - Автомоб.пром., 1980, №10, с.18-19.

64. Евграфов А.Н., Московкин В.В., Петрушов В.А., Стригин И.А. Геометрические и кинематические параметры колеса и его сопротивление качению. - Автомоб.пром., 1982, №8, с.16-17.

65. Погосбеков М.И. О плече сопротивления качению эластичного колеса. - Изв.ВУЗов, Машиностроение, 1970, №7, с.112-115.

66. Мирофанов В.И., Гусев В.И., Макаров С.Г., Бочаров Н.Ф. Определение свободного радиуса модели колесного движителя и его соответствие прототипу. - Изв.ВУЗов, Машиностроение, 1971, №8, с.86-89.

67. Митрофанов В.И., Бочаров Н.Ф., Коновалов В.В., Макаров С.Г., Гусев В.И., Малинин В.А. Определение изменения радиуса качения колесного движителя по испытаниям его модели. - Изв.ВУЗов, Машиностроение, 1973, №7, с.104-107.

68. Макаров С.Г. Некоторые вопросы теории качения колеса. - Изв.ВУЗов, Машиностроение, 1972, №11, с.90-95.

69. Шершнев А.А., Попов М.Т. Температуры, развивающиеся при качении автомобильной шины. - Изв.ВУЗов, Машиностроение, 1975, №5, с.127-131.

70. Попов С.Д. Постановка задачи о построении математической модели автомобильного движителя. - Изв.ВУЗов, Машиностроение, 1976, №2, с.116-120.

71. Краснов А.Е. Метод и результаты теоретических исследований векторной модели процессов взаимодействия колеса с поверхностью. - Изв.ВУЗов, Машиностроение, 1982, №12, с.62-67.

72. Водяник И.И. Влияние тангенциальных деформаций пневматической шины на некоторые показатели работы колеса. - Изв.ВУЗов, Машиностроение, 1983, №12, с.102-105.

73. Полунгян А.А., Фоминых А.Б. Модель взаимодействия эластичного колеса с горизонтальной плоскостью. - Изв.ВУЗов, Машиностроение, 1984, №1, с.97-101.

74. Левин М.А., Фуфаев Н.А. Теория качения деформируемого колеса. - М., Наука, 1989.

75. Балабин И.В. Формирование нагрузочных режимов и расчет напряженного состояния элементов конструкции автомобилей общего назначения. - Дисс.на соискание уч.ст. доктора технических наук, М., 1987.

76. Кольцов В.И. К построению модели качения эластичного колеса при быстро меняющихся нагрузках. -Изв.ВУЗов, Машиностроение, 1969, №2, с.106-110.

77. Дербарендикер А.Д., Бородин Ю.П. К теории качения эластичного колеса при колебаниях. - Изв.ВУЗов, Машиностроение, 1970, №5, с.151-154.

78. Дербарендикер А.Д., Бородин Ю.П. Анализ качения колеса при колебаниях с учетом тангенциальной эластичности шин. - Изв.ВУЗов, Машиностроение, 1970, №6, с.126-130.

79. Силуков Ю.Д. Динамика работы пневматического колеса. - Изв.ВУЗов, Машиностроение, 1970, №11, с.115-123.

80. Шумаев В.В. Качение шины при переменной нагрузке. - Изв.ВУЗов, Машиностроение, 1974, №8, с.115-118.

81. Комкин А.И., Макаров С.Г. Оценка возмущающего действия со стороны шины при анализе вибронагруженности автомобиля. - Изв.ВУЗов, Машиностроение, 1988, №9, с.90-94.

82. Комкин А.И., Макаров С.Г., Жеглов Л.Ф., Ермаков В.К. Влияние возмущающего воздействия со стороны шины на вибронагруженность автомобиля. - Изв. ВУЗов, Машиностроение, 1989, №11, с.85-89.

83. Heatcote H.L. The Ball Bearing in the Making, under test and on Service. Proc. of the Inst. of automobile Engineers, vol.15, 1921.

84. Palmgren A. Sliding Friction in Ball Bearings. Engineering, vol.107, 1919, p.289.

85. Джонсон К. I. Влияние упругой деформации при движении шарика, перекатываемого между поверхностями. II. Ответы автора.

86. Пинегин С.В. Контактная прочность и сопротивление качению. - М., 1969.

87. Пинегин С.в. Трение качения в машинах и приборах. - М., 1976.

88. Пинегин С.В., Орлов А.В. Сопротивление движению при некоторых видах свободного качения. - Изв. АН СССР, ОТН, Механика и машиностроение, №3, 1961.

89. Halling J. The MicroslipBetween a Rolling Element and Its Track Arising From Geometric Conformity and Applied Surface Tranctions. Jour.of Mech. Eng. Science, vol.6, 1964, p.64.

90. Хеллинг Д. Микроскольжение между шариком и его беговой дорожкой в шариковых упорных подшипниках. - Теорет.основы инженерных расчетов, №1, 1966, с.172, изд. «Мир».

91. Чудаков Е.А. Коэффициент сцепления между автомобильной шиной и дорогой. - Изв. АН СССР, ОТН, 1938, №5.

92. Вирабов Р.В. Определение работы трения в контакте при качении колеса с пневматической шиной по жесткому основанию. - Автомоб.пром., 1975, №11.

93. Вирабов Р.В. О качении колеса с пневматической шиной по жесткому основанию. - Изв.ВУЗов, Машиностроение, 1967, №6, с.89-96.

94. Соколова В.А. Исследование распределений напряжений в контакте колеса с опорной поверхностью. - Труды НАМИ, вып.54, 1959.

95. Балабин И.В. Влияние кривизны протектора шин на эксплуатационные свойства легкового автомобиля. - Каучук и резина, №12, 1974.

96. Фортунков Д.В. Исследование причин неравномерного износа шин легкового автомобиля. - Автомоб.пром., №11, 1975.

97. Слюдиков Л.В. и др. Влияние кривизны беговой дорожки на работу трения в контакте шины, нагруженной крутящим моментом. - Производство шин, РТИ и АТИ, №6, 1972.

98. Петров В.М. Основы теории качения пневматического колеса. - Вестник машиностроения, 1986, №2.

99. Вирабов Р.В. Об оценке сопротивления качению колеса с пневматической шиной. - Вестник машиностроения, 1987, №7, с. 46-51.

100. Литвинов А.С. Управляемость и устойчивость автомобиля. - М., Машиностроение, 1971, 416 с.

101. Антонов Д.А. К вопросу о коррекции коэффициента сопротивления уводу эластичного колеса. - Автомоб.пром., 1968, №12, с.15-18.

102. Антонов Д.А. К вопросу о влиянии тяговых и тормозных сил на коэффициент сопротивления уводу. - Автомоб.пром., 1969, №6, с.24-26.

103. Антонов Д.А. О характере изменения параметров эпюры боковых сил при уводе колеса. - Автомоб.пром., 1970, №8, с.11-12.

104. Кнороз В.И., Макарян Р.Г., Юрьев Ю.М. Виляние увода на сопротивление качению шин. - Автомоб.пром., 1972, №11, с.15-17.

105. Кнороз В.И., Петров И.П., Юрьев Ю.М. Влияние некоторых эксплуатационных факторов на коэффициент сопротивления боковому уводу шин. - Автомоб.пром., 1971, №5, с.15-16.

106. Коротков Л.И. К вопросу о влиянии боковой эластичности шин на устойчивость автомобиля при прямолинейном движении. - Изв.ВУЗов, Машиностроение, 1965, №9, с.104-107.

107. Макаров С.Г., Приходько В.И. Влияние продольной деформации шин на характеристики бокового увода эластичного колеса. - Изв.ВУЗов, Машиностроение, 1979, №5, с.86-99.

108. Попов С.Д. Теория бокового увода для случая неустановившегося движения эластичного колеса. - Изв.ВУЗов, Машиностроение, 1986, №3, с.91-95.

109. Королев А.И., Мирзоев Г.К., Слюдиков Л.Д. Исследование влияния передней подвески и рулевого привода на износ шин автомобиля. - Автомоб.пром., 1965, №5, с. 28-31.

110. Приходько В.И. Исследование процесса увода широкопрофильных шин. - Автомоб.пром., 1978, №7, с.27-29.

111. Джапаридзе Т.Н. К вопросу определения сил сопротивления качению при криволинейном движении автомобиля. - Тр.конф. по теории и расчету автомобилей, работающих в горных условия, Тбилиси, 1968.

112. Хренова В.И. Исследование влияния схемы механизма передвижения на основные параметры универсальных электропогрузчиков. - Дисс. на соиск. уч. степ.канд. техн. наук, М., 1973.

113. Келдыш В.М. Шимми трехколесного шасси самолета. - Тр. ЦАГИ, №564, 1945, изд. бюро техники НКАП.

114. Кнороз В.И. Качение автомобильного колеса с наклоном к дороге. - Автомоб.пром., 1956, №9, с.24...32.

115. Литвинов А.С. Основные проблемы поворота автомобилей высокой проходимости. - Проблемы повышения проходимости колесных машин. - Изд. АН СССР, М., 1959.

116. Freudenstein G. LuftreifenbeiSchrag und Kurvenlauf (Experimentalle und theoretischeUntersuchung an LKW-Reifen). DeutdcheKraftfahrtforschung, 1961, H. 152.

117. Fiala E. SeitenkrafteamrollendenLuftreifen. VDJ-Z, 1954, Bd. 96, ¹29, S. 973...79. Пер. ЦПБ №17347, М., 1956.

118. Schlippe, Ditrich R. ZurMechanik der Luftreifen. Berlin, Zentrale fur WissenschaftlicheBerichtwagen der Luftfahrt-forachung der Generalluftzeugmeister (ZWB), 1942. Пер. ЦПБ №8710, М., 1949.

119. Редчиц В.В. О влиянии относительного поворота контактного отпечатка движущегося колеса. - Автомоб.пром., 1974, №3.

120. Редчиц В.В., Малов С.С., Таболин В.В. Исследование момента сопротивления повороту в зависимости от радиуса обкатки. - Экспресс-информация «Конструкция автомобилей». - М., 1976, №11.

121. Никулин П.И. Исследование работ колесного движителя при криволинейном движении. - Дисс. на соиск. учен.степ. к.т.н., Воронеж, 1975.

122. Джапаридзе Т.Н. Исследование некоторых вопросов криволинейного движения автомобиля. - Дисс. на соиск. учен.степ. к.т.н., Тбилиси, 1974.

123. Стоянов С., Георгиев Г. Съпротивления на пътя и скоростпри движение на кар по криволинеен път. - Годишнии на научно-изс. и проектноконст. ин-т по електрокари и мотокари. - София, изд. «Техника», 1965.

124. Грузоподъемные машины. Учебное пособие для ВУЗов п/р Александрова М.П. - М., Высшая школа, 1973.

125. Каран Е.Д. Исследование криволинейного движения пневмоколес по деформируемым опорным поверхностям. - Дисс. на соиск. учен. степ. к.т.н.. - МАДИ, 1969.

126. Отчет (промежуточный) по научно-исследовательской работе №100-67 «Исследование криволинейного движения трактора с 4 ведущими управляемыми одинакового диаметра колесами». - Гос. регистр №68047977. Научный руков. Полетаев А.Ф., отв. исполн. Ганькин Ю.А. - М., МАМИ, 1967.

127. Забавников Н.А., Наумов В.Н. и др. Взаимодействие криволинейно движущегося колеса с деформируемым грунтом. - Изв.ВУЗов, Машиностроение, 1975, №1, с. 119-124.

128. Наумов В.Н., Назаренко Б.П. О кинематике точки обода жесткого колеса. - Изв.ВУЗов, Машиностроение, 1976, №11, с.109-114.

129. B.D.A. Phillips. The Effect of Longitudinal Force on Bias and Radial Tires. The Science and Technology. 1976, v.4, VIII, ¹3, p.p. 155-158. Пер. ВЦП № А-18657, М., 1977.

130. Серов А.В. Современные станции диагностики автомобилей. - НИИавтопром, 1971.

131. Говорущенко Н.Я. Диагностика технического состояния автомобилей. - М., Транспорт, 1970.

132. Коротков Л.И. Выбор оптимальных параметров стенда для диагностики тяговых и тормозных свойств автомобилей. - Сб. Автомобильный транспорт, вып. 8. - Киев, Техника, 1971.

133. Коротков Л.И. Исследование сопротивления качению шин на роликовых стендах. - Автомобильная промышленность, №10, 1977.

134. Куликов Н.К. Работа автомобильного колеса. - Труды НАМИ, вып. 77 - М., Машгиз, 1955.

135. Борозняк Ю.П. Определение сопротивления качению колес машины. - Автомобильный транспорт, вып. 4. - Киев, Техника, 1968.

136. Борозняк Ю.П. Определение радиуса качения автомобильного колеса в ведомом режиме по недеформируемой поверхности. - Автомобильный транспорт, вып. 3 - Киев, Техника, 1966.

137. Бухин Б.Л. Введение в механику пневматических шин. - М., Химия, 1988, 224 с.

138. Clark S.K. Tire rolling resistance. D.J. Schuring, ed. Rubber Div, ACS, 1983. P. 1-24.

139. Черкасов И.И. Механические свойства грунтов в дорожном строительстве. - М., Транспорт, 1976.

140. Беккер М.Г. Введение в теорию системы «местность-машина». - М., Машиностроение, 1973, 520 с.

141. Бабков В.Ф., Бируля А.К., Сиденко В.М. Проходимость колесных машин по грунту. - М., Автотрансиздат, 1959.

142. Бабков В.Ф. Сопротивление качению колес на деформирующейся опорной поверхности. - в кн. Труды МАДИ. вып.16/МАДИ, 1955, с. 79-106.

143. Вонг Дж. Теория наземных транспортных средств. - М., Машиностроение, 1982, 284 сю

144. Летошнев М.Н. Сельскохозяйственные машины. - М., Сельхозгиз, 1940.

145. Горячкин В.П. Собрание сочинений. Ч.1. - М., Сельхозгиз, 1937.

146. Ляско М.И. Влияние распределения нагрузки между осями колесной повозки на сопротивление качению. - Ивз.ВУЗов, Машиностроение, 1972, №1, с.100-104.

147. Гребенщиков В.И. Исследование проходимости автомобиля по мягким грунтам. - Дисс.насоиск.учен.степ.канд.техн.наук. - М., МАМИ, 1952, 223 с.

148. Пирковский Ю.В., Чистов М.П. Затраты мощности на колееобразование при качении жесткого колеса по деформируемому грунту. - Тр. НАМИ. 1971, №3, с. 18...34.

149. Пирковский Ю.В., Чистов М.П. Об изменении некоторых параметров грунта при повторных проходах колеса по одной колее. - Труды НАМИ, вып. 154, 1975, с.21-26.

150. Пирковский Ю.В., Чистов М.П. Расчетное определение энергетических параметров, характеризующих качение колеса по деформируемому грунту. - Изв.ВУЗов, Машиностроение, М., 1972, №9, с.98-102.

151. В.Н.Добромиров. Пути оценки и снижения нагруженности трансмиссии полноприводных автомобилей типа 8х8 общетранспортного назначения. - Дисс. на соискание ученой степени канд.тех.наук, М., МАМИ, 1989.

152. Рождественский Ю.Л., Наумов В.Н. Определение параметров равновесного контакта упругого колеса с грунтом. - Изв.ВУЗов, Машиностроение, М., 1986, №8, с.93-97.

153. Забавников Н.А., Наумов В.Н., Назаренко Б.Н., Рождественский Ю.Л. Взаимодействие криволинейно движущегося колеса с деформируемым грунтом. - Изв.ВУЗов, Машиностроение, М., 1975, №1, с.121-127.

154. Агейкин Я.С. Исследование работы шин переменного давления на деформируемом грунте. - сб. Проблемы повышения проходимости колесных машин, изд. АН СССР, 1959.

155. Агейкин Я.С. Оценка деформируемости грунта при рассмотрении проходимости автомобилей. - Автомоб.пром., 1970, №6, с.16-18.

156. Агейкин Я.С. Вездеходные колесные и комбинированные движители (теория и расчет). - М., Машиностроение, 1972.

157. Кошарный Н.Ф. Технико-эксплуатационные свойства автомобилей высокой проходимости. - Киев, Вища школа, 1981, 208 с.

158. Кошарный Н.Ф. Некоторые закономерности динамики взаимодействия колеса с грунтом. - Автомоб.пром., 1977, №1, с.15-17.

159. Полетаев А.Ф. Основы теории сопротивления качению и тяги жесткого колеса по деформируемому основанию. - М., Машиностроение, 1961, 68 с.

160. Гуськов В.В. Оптимальные параметры сельскохозяйственных тракторов. - М., Машиностроение, 1966.

161. Кацыгин В.В. О закономерности сопротивления почв сжатию. - Механизация и электрификация сельского хозяйства, 1962, №4.

162. Кацыгин В.В., Орда А.Н. Воздействие колесных ходовых систем на почву. - Механизация и электрификация сельского хозяйства, 1981, №4, с.41-44.

163. Орда А.Н. Исследование механики колееобразования и уплотнения почвы колесными движителями и обоснование требований к многоосным ходовым системам. - Автореферат на соиск.учен.степ.канд.техн.наук, М., 1978.

164. Водяник И.И. Анализ взаимодействия двигателя с грунтом с помощью механической модели. - Изв.ВУЗов, Машиностроение, М., 1976, №6, с.109-114.

165. Золотаревская Д.И. Взаимосвязь различных моделей деформирования почв. - Механизация и электрификация сельского хозяйства, 1983, №5, с.10-16.

166. Золотаревская Д.И. Влияние скорости качения на тяговые свойства колес и сопротивление качению по упруго-вязкой почве. - Изв.ТСХА, 1976, вып.1

167. Бойков В.П., Левин М.А. Определение некоторых показателей взаимодействия колесного движителя трактора с почвогрунтом. - Тракторы и сельхозмашины, 1986, №6, с.6-10.

168. Бойков В.П., Левин М.А. Взаимодействие эластичного колеса с основанием, характеризующимся упруговязкопластичными свойствами. - С. Конструирование и эксплуатация автомобилей и тракторов, Минск, Вышэйшая школа, 1986, вып.1, с.49-50.

169. Альбер А.Я., Брегадзе М.Д., Семенов В.М. О математической модели динамики взаимодействия движителей с грунтом. - Изв.ВУЗов, Машиностроение, М., 1988, №11, с.81-84.

170. Забавников Н.А., Мирошниченко А.В. Взаимодействие колеса с деформируемым основанием при учете скорости движения. - Изв.ВУЗов, Машиностроение, М., 1983, №12, с.102-105.

171. Водяник И.И. Соотношение скоростей деформирования пневматической шины и грунта. - Изв.ВУЗов, Машиностроение, М., 1982, №2, с.86-89.

172. Мирошниченко А.В. Энергозатраты на движение колеса транспортной машины с учетом деформирования грунта. - Диссертация на соискание ученой степени канд.техн.наук., М., 1985, 185 с.

173. Пирковский Ю.В. Сопротивление качению многоприводных автомобилей и автомобильных поездов по твердым дорогам и деформируемому грунту. - Диссертация на соискание ученой степени канд.техн.наук., М., МВТУ, 1974, 399 с.

174. Говорущенко Н.Я. Основы теории эксплуатации автомобилей. - Киев, Вища школа, 1971.

175. Тарасов В.Н. Теоретический радиус качения эластичного колеса. - Автомоб.пром., 1985, №1, с.22-23.

176. Бабков В.Ф. Качение автомобильного колеса по грунтовой поверхности. - Труды МАДИ, Дориздат, 1053, вып. 15.

177. Ульянов Н.А. Основы теории и расчета колесного движителя землеройных машин. - М., Дориздат, 1962.

178. Семенов В.М., Армадеров Р.Г. О методике определения коэффициента сцепления эластичного колеса на деформируемой поверхности. - Автомоб.пром., 1962, №10, с.13-16.

179. Лазарев В.В., Синицын С.С. Анализ процесса колеобразования при качении пневматического колеса по деформируемому грунту. - Изв.ВУЗов, Машиностроение, 1983, №5, с.84-87.

180. Чистов М.П. Математическое описание качения деформируемого колеса по деформируемому грунту. - Изв.ВУЗов, Машиностроение, 1986, №4, с.12...38.

181. Кнороз В.И., Хлебников А.М., Петров И.П. Основные характеристики взаимодействия шин с опорной поверхностью. - Тр. НАМИ, вып.143, 1973, с.3...54.

182. Маршак А.Л. О форме поверхности пневматических колес при контакте их с почвой. - Сельхозмашина, 1956, №3, с.22...24.

183. Ламовицкий В.С. Работа колеса. - Труды БТВ, 1964, №8 (42).

184. Агейкин Я.С. Выбор размеров шин с регулируемым внутренним давлением воздуха. - Автомоб.пром., 1960, №12, с.14-18.

185. Рокас С.И. Определение основных параметров грунтов с целью оценки тягово-сцепных качеств автомобилей. - Автомоб.пром., 1965, №1, с.24-26.

186. Кнороз В.И. и др. Особенности грунтовой поверхности. - Тр. НАМИ, вып.142, 1973, с.37...65.

187. Агейкин Я.С. Проходимость автомобилей. - М., Машиностроение, 1981, 232 с.

188. Пирковский Ю.В., Шухман С.Б. Теория движения полноприводного автомобиля (прикладные вопросы оптимизации конструкции шасси). - М., АОЗТ ЦНИИОМТ, 1999, с.152.

189. Хабатов Р.Ш., Золотаревская Д.И., Ходыкин В.Т. Моделирование уплотнения почвы колесными движителями. - Тракторы и сельхозмашины, 1985, №1, с.6-9.

190. Безбородова Г.Б., Кошарный Н.Ф., Задорожный В.В. К определению сопротивления качению колес многоосных автомобилей по сминаемым грунтам. - Автомоб.пром., Киев, 1968, №5, с.24-28.

191. Ксеневич И.П., Скотников В.А. О работе тракторных тандемколес. - Тракторы и сельхозмашины, 1978, №10.

192. Островцев А.В. Математическая модель прямолинейного движения автомобиля 4х2 по деформируемому грунту. - Научно-техн. сборник, в/ч 63539, 1988, №4, с.45-52.

193. Островцев А.В. Методы оценки и пути повышения опорной проходимости полноприводных грузовых автомобилей. - Диссертация на соискание ученой степени канд.техн.наук., М., 1989.

194. Кривицкий А.М. Оценка эффективности колесного движителя для выбора и обоснования характеристик шин универсально-пропашных тракторов. - Автореферат дисс. на соискание ученой степени канд.техн.наук., Мн, 1986.

195. Площаднов А.Н. Улучшение управляемости машинно-тракторного агрегата на базе универсально-пропашного трактора класса 2 путем рационального выбора параметров направляющих колес. - Автореферат дисс. на соискание ученой степени канд.техн.наук., М., МАМИ, 1987.

196. Назаренко Б.П., Наумов В.Н., Маленков М.И. О моменте сопротивления повороту жесткого колеса. - Изв.ВУЗов, Машиностроение, 1983, №4, с.75-79.

197. Егоров А.И., Петрушов В.А. О радиусе качения и коэффициенте буксования эластичного колеса на грунте. - Автомоб.пром., 1976, №9, с.17-18.

198. Танклевский М.М. О нагрузках, обуславливающих скольжение и буксование колеса при качении по сминаемому основанию. - Изв.ВУЗов, Машиностроение, М., 1969, №12, с.138-144.

199. Левин М.А., Бойков В.П. Исследование стационарного качения деформируемого колеса по деформируемому грунту. - Теорет. и прикладная механика, сб.тр. Акад. наук БССР, Минск, изд. АБ БССР, 1984, вып.11, с.70-75.

200. Бочаров Н.Ф., Гусев В.И., Макаров С.Г., Семенов В.М., Краденов Е.Б. Особенности качения пневмокатков по твердой дороге и деформируемому грунту. - Автомоб.пром., 1964, №10, с.22-25.

201. Бочаров Н.Ф., Семенов В.М., Соловьев В.И., Моторин Ю.В. Влияние шага грунтозацепов на сцепные (свойства) качества движителя с низкими равномерно распределенными удельными давлениями в контакте с грунтом. - Изв.ВУЗов, Машиностроение, 1968, №2, с.130-132.

202. Бочаров Н.Ф., Семенов В.М., Гусев В.И. О трехчленном законе сил сцепления высокоэластичных движителей низких удельных давлений. - Изв.ВУЗов, Машиностроение, М., 1974, №2, с.132-135.

203. Бочаров Н.Ф., Армадеров Р.Г. и др. Движители транспортных средств высокой проходимости. - М., Транспорт, 1972.

204. Вирабов Р.В., Мамаев А.Н. Анализ кинематических и силовых соотношений при качении колеса по жесткому основанию. Механика машин. - М, Наука, 1980, с.101-106.

205. Вирабов Р.В., Мамаев А.Н. Исследование контактных явлений при криволинейном качении тороидального колеса. Изв. ВУЗов, Машиностроение, 1980, №2, с.33-38.

206. Мамаев А.Н., Абузов В.И. Качение эластичного колеса по двум жестким барабанам. – Автомобильная промышленность, 2012, № 10, с. 19.

207. Вирабов Р.В., Мамаев А.Н., Маринкин А.П., Юрьев Ю.М. Влияние режима качения эластичного колеса на величину боковой силы при боковом уводе. - Вестник машиностроения, 1986, №1, с.33-35.

208. Вирабов Р.В., Мамаев А.Н., Ворошин Н.Н. Влияние тороидальности эластичного колеса на неравномерность его износа по ширине беговой дорожки. Изв. ВУЗов,"Машиностроение",1983, № 9, с.94-97.

209. Вирабов Р.В., Мамаев А.Н. К вопросу о наименьшей величине коэффициента сопротивления качению эластичного колеса по жесткой горизонтальной поверхности. Изв.ВУЗов,"Машиностроение",1987, № 10, с.85-88.

210. Мамаев А.Н. Влияние конструктивных параметров колесных машин на ресурс деталей и узлов трансмиссии. Вестник машиностроения,1991, № 1, с.20-22.

211. Балабина Т.А., Мамаев А.Н., Чепурной С.И. Определение соотношения углов развала и схождения эластичных колес, обеспечивающего наименьшее сопротивление качении. Изв. МГТУ "МАМИ",№ 1(15),2013, т.1.

212. Балабина Т.А., Мамаев А.Н., Чепурной С.И. Силовые характеристики колеса при качении с развалом и схождением. "Фундаментальные проблемы технических наук", сб. статей Междунар. научно-практической конференции, 19 февр. 2014, г. Уфа.

©Мамаев А.Н., Балабина Т.А., 2014

УДК 62

В.В. Марков
к.т.н., доцент кафедры «Приборостроение, метрология и сертификация»
Государственный университет – учебно-научно-производственный комплекс
г. Орёл, Российская Федерация

МЕТОД НЕРАЗРУШАЮЩЕГО КОНТРОЛЯ КАЧЕСТВА СБОРКИ ОПОРЫ КАЧЕНИЯ ПО ПАРАМЕТРАМ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО СОПРОТИВЛЕНИЯ ПОДШИПНИКА

Введение

Опоры качения являются широко распространенными элементами механических систем и определяют их качество по группам показателей назначения и надёжности. Основным элементом опоры качения является подшипник, однако высокое качество подшипника ещё не гарантирует качество опоры качения (подшипникового узла), составной частью которой он является. Причиной этого является зависимость технического состояния опоры качения от внешних факторов, возникающих при монтаже подшипника в корпус и на вал подшипникового узла: характер и интенсивность монтажных нагрузок, перекосы, смещение осей, ударные нагрузки и другие. Вследствие действия перечисленных факторов, геометрические параметры дорожек качения колец подшипника, собранного в узле, могут существенно отличаться от параметров этого же подшипника до проведения сборочной операции.

Поэтому при изготовлении, эксплуатации и ремонте ответственных механизмов и машин необходимо осуществлять неразрушающий контроль качества сборки опоры качения, направленный на оценку технического состояния дорожек качения колец подшипника непосредственно в данной опоре. Показателями качества сборки опоры качения могут выступать геометрические параметры дорожек качения колец подшипника: шероховатость, отклонения формы (овальность, огранка) и расположения (радиальное биение).

Среди известных методов неразрушающего контроля и технической диагностики подшипников выделяют электрические методы, при реализации которых о состоянии подшипника судят по значениям его электрических параметров. Эти методы широко используются, благодаря универсальности, сравнительной простоте реализации и относительной безынерционности. Наиболее разработанными в теоретическом и прикладном планах являются электрорезистивные методы, в частности, методы, основанные на использовании параметров «нормированное интегральное время (НИВ) электрического контактирования в подшипнике» и «среднее сопротивление подшипника». Существенный вклад в разработку и систематизацию данных методов внесли Дж. Кеннел, Д. Снидекер [1], Т. Тэллиан [2], С.Ф. Корндорф,

В.В. Клюев, К.В. Подмастерьев, Е.В. Пахолкин [3-5], Ю.М. Санько [6], И.И. Карасик [7], Н.К. Мышкин, М.И. Петроковец [8] и ряд других учёных.

Параметр НИВ является точечной оценкой функции распределения электрического сопротивления подшипника и характеризует вероятность контактирования колец и тел качения. На основе этого параметра разработаны методы, обеспечивающие решение ряда диагностических задач, включая усреднённую комплексную оценку состояния подшипника с возможностью контроля отклонений формы его деталей. Однако, данные методы имеют существенные ограничения области применения – они эффективны только при работе подшипника в условиях смешанной смазки (при граничной смазке НИВ принимает единичное значение, при жидкостной – нулевое), а при измерении НИВ за малые интервалы времени (необходимо при контроле отклонений формы и расположения поверхностей) имеет место значительная погрешность. Параметр «среднее сопротивление» является более универсальным и пригодным к использованию при различных условиях смазки в подшипнике. Однако, несмотря на известность методов усреднённой комплексной оценки состояния подшипника по параметру «среднее сопротивление», методы определения вида и оценки параметров отклонений формы и расположения рабочих поверхностей его деталей, неизвестны. Поэтому проблема разработки метода неразрушающего контроля качества сборки опоры качения по параметрам электрического сопротивления подшипника, работоспособного при произвольных условиях смазки, является *актуальной*.

Создание данного метода включает в себя комплекс научных и технических задач, к основным из которых относятся следующие:

1) разработка математической модели электрического сопротивления подшипника качения с учётом отклонений геометрических параметров рабочих поверхностей его деталей;

2) проведение теоретических исследований влияния отклонений геометрических параметров на числовые характеристики функции электрического сопротивления подшипника;

3) разработка метода неразрушающего контроля, включая синтез и обоснование диагностических параметров, разработку методик контроля и рекомендаций по выбору режимов контроля;

4) проведение экспериментальных исследований по подтверждению правильности теоретических положений, работоспособности и эффективности предложенного метода неразрушающего контроля.

В число элементов научной новизны предложенного метода входят:

– математическая модель, раскрывающая влияние отклонений геометрических параметров рабочих поверхностей деталей подшипника

качения, работающего в условиях различных видов смазки, на его электрическое сопротивление;

– характер влияния различных по виду отклонений геометрических параметров рабочих поверхностей деталей подшипника качения на функцию его электрического сопротивления;

– комплекс диагностических параметров, обеспечивающих решение задач усредненной комплексной оценки состояния подшипника (с учетом шероховатости рабочих поверхностей его деталей) и определения характеристик отклонений формы дорожек качения его колец;

– зависимости диагностических параметров от значений параметров шероховатости рабочих поверхностей деталей подшипника и от характеристик различных видов отклонений формы дорожек качения его колец.

Ценность выполненной работы состоит в следующем:

– разработаны алгоритмы диагностирования, позволяющие проводить усредненную комплексную оценку состояния подшипника качения, определение вида, оценку значения и ориентации доминирующих отклонений формы дорожек качения его колец;

– разработаны и обоснованы рекомендации по выбору режимов контроля при реализации различных методик.

Представленные в работе теоретические исследования базируются на положениях теорий: контакта реальных поверхностей [9]; электропроводности контакта двух шероховатых тел [10]; контактной гидродинамики [11]; вероятностей [12]; упругости [13].

Предложения по совершенствованию методов контроля опор качения по параметрам электрического сопротивления подшипника сформулированы по результатам патентного поиска по проблеме электрических методов трибологических исследований глубиной 30 лет [14].

Теоретическая база метода контроля

Сложность конструкции подшипника качения потребовала анализа составляющих его электрического сопротивления. Анализ составляющих сопротивления фрикционного контакта в подшипнике позволил отметить, что в условиях жидкостной смазки сопротивление контакта тела качения с кольцом определяется толщиной смазочной плёнки, разделяющей контактирующие поверхности, и её удельным сопротивлением; при граничной смазке сопротивление объекта определяется сопротивлением поверхностных плёнок и сопротивлением стягивания; при электрическом контактировании сопротивление фрикционного контакта определяется только сопротивлением стягивания. В результате получена обобщенная математическая модель сопротивления фрикционного контакта тела и дорожки качения, учитывающая наиболее существенные его

составляющие (сопротивление $R_{СТ}$ стягивания и сопротивление $R_{СП}$ смазочной плёнки) в различных условиях смазки:

$$\begin{cases} R_{СТ} = \dfrac{\rho}{2 \cdot n_{П} \cdot r_{В(Н)}}, \ \textit{при} \ \ h < 3\,\textit{нм}; \\ R_{СП} = \dfrac{\rho_{пов}}{\pi \cdot n_{П} \cdot r^{2}_{В(Н)}}, \ \textit{при} \ \ 3 \le h < 10\,\textit{нм}; \\ R_{СП} = \rho_{ГП} \cdot \dfrac{h}{S_h}, \ \textit{при} \ \ 0{,}01 \le h < 1\,\textit{мкм}; \\ R_{СП} = \rho_{СМ} \cdot \dfrac{h}{S_h}, \ \textit{при} \ \ 1 \le h \le 30\,\textit{мкм}. \end{cases} \quad (1)$$

где ρ, $\rho_{пов}$, $\rho_{ГП}$, $\rho_{СМ}$ – соответственно, удельное электрическое сопротивление контактирующих поверхностей, смазочных пленок с туннельной проводимостью, граничной смазочной плёнки и смазочного материала;

h – минимальное значение толщины смазочной плёнки между телом и дорожкой качения;

S_h – площадь, на которой толщина смазочной пленки равна h;

$r_{В(Н)}$ – радиус пятна металлического контакта тела и дорожки качения кольца;

$n_{П}$ – число пятен контакта в контактной зоне.

Модель обобщает выражения для электрического сопротивления контакта тела и дорожки качения во всех возможных условиях смазки в подшипнике. Она принята в качестве исходной при разработке математической модели электрического сопротивления подшипника качения, заложенной в основу электрорезистивного метода контроля.

В основу математической модели заложена гипотеза о случайном характере изменения сопротивления подшипника, в качестве первичного случайного фактора рассматривается высота микронеровностей рабочих поверхностей, а при разработке модели приняты следующие *допущения*:

– основными составляющими электрического сопротивления подшипника являются сопротивление стягивания и смазочной пленки [10];

– для описания топографии поверхностей используются функции распределения материала по высоте шероховатого слоя и материала по высоте единичного выступа [9];

– единичная неровность моделируется сферическим сегментом [9];

– контакт неровностей считается упругим [15];

– для описания деформаций деталей используется теория Герца [15];

– для описания высоты микронеровностей рабочих поверхностей используется распределение Найака [8, 12];

– переход от контакта шероховатой поверхности с гладкой к контакту двух шероховатых поверхностей осуществляется оценкой композиции законов распределения высоты микронеровностей поверхностей [9].

Для описания отклонений формы и расположения поверхностей в модели использован метод гармонического анализа [13]; для описания локальных дефектов – функции на базе полиномов Чебышева и Баттерворта [4]; для описания высоты микронеровностей (шероховатости) использовано распределение Найака, основанное на положениях теории случайных полей [8, 12]. Основные выражения, составляющие математическую модель электрического сопротивления фрикционного контакта в подшипнике качения в условиях граничной или смешанной смазки, приведены в таблице 1.

Расчёт сопротивления фрикционного контакта в подшипнике проводят по формулам и вспомогательным выражениям (2) – (9), последовательно определяя промежуточные параметры математической модели: параметры отклонений формы и расположения, локальных дефектов, высоту микронеровностей контактирующих поверхностей (7) – (9); сближение δ контактирующих поверхностей (6); контурную площадь контакта A_c, число всех неровностей N в пределах контурной площади контакта, номинальный зазор d между поверхностями (5); фактическую площадь контакта A_r (4); приведённый радиус микронеровности β, вспомогательные переменные функции электрического сопротивления a_R и $\Psi_R(h)$ (3); электрическое сопротивление фрикционного контакта при граничной смазке $R_{ст}$ (сопротивление стягивания) или при смешанной смазке $R_{сп}$ (сопротивление смазочной плёнки) (2). Получаемая таким образом модель учитывает конструктивные параметры подшипника (номинальные размеры деталей, свойства материалов, шероховатость, отклонения формы и расположения рабочих поверхностей, их локальные дефекты), а также режимы и условия его эксплуатации.

Таблица 1 – Основные элементы математической модели

Граничная смазка	Смешанная смазка	Номер формулы
$R_{ст} = a_R \cdot \Psi_R(h)$	$R_{сп} = \alpha_{см} \cdot R_{ст}$; $\alpha_{см} = \frac{\rho_{см}}{\rho_м} \cdot \frac{h_0}{r_к} \cdot \frac{A_r}{A_c - A_r}$	(2)
$a_R = \frac{\rho_м}{2N\sqrt{\beta d}}$; $\Psi_R(h) = \left\| L\left(\frac{d}{R_q}\right) \cdot \left[1 - L\left(\frac{d}{R_q}\right)\right] + \frac{R_q}{d\sqrt{2\pi}} \cdot \left[\frac{1}{2} - L\left(\frac{d}{R_q}\right)\right] \cdot exp\left(-\frac{d^2}{2R_q^2}\right) - \frac{1}{4} \right\|^{-0,5}$		(3)
$A_r = a_r \cdot \Psi_A(h)$; $a_r = \pi N \beta d$; $\beta = \sqrt{r_{пр} r_{поп}}$	$\Psi_A(h) = L\left(\frac{d}{R_q}\right) + \frac{R_q}{d \cdot \sqrt{2\pi}} \cdot exp\left(-\frac{d^2}{2 \cdot R_q^2}\right) - \frac{1}{2}$;	(4)

$A_c = \pi \cdot n_a \cdot n_b \cdot \sqrt[3]{\left(\frac{3 \cdot F_r}{E \cdot \Sigma\rho}\right)^2} - A_Д$; $N = \frac{A_c}{S_{m1} \cdot S_{m2}}$; $d = R_p - \delta$	(5)
$\delta = a \cdot \sqrt[3]{\Sigma\rho}$; $a = \frac{3}{2} \cdot \frac{2K}{\pi n_a} \cdot \sqrt[3]{\frac{1}{3} \cdot \left(\frac{1-\eta^2}{E}\right)^2 \cdot F_r^2}$	(6)
$f(h_1) = \frac{\sqrt{3}}{2\pi} \cdot \left\{ h_1 \cdot \sqrt{\frac{3(2\alpha-3)}{\alpha^2}} \cdot exp\left(-C_1 \cdot h_1^2\right) + \frac{3\sqrt{2\pi}}{2\alpha} \cdot \left(h_1^2 - 1\right) \cdot \left[1 + \mathrm{erf}\left(h_1 \cdot \sqrt{\frac{3}{2(2\alpha-3)}}\right)\right] \times \right.$ $\left. \times exp\left(-\frac{h_1^2}{2}\right) + \sqrt{\frac{2\pi\alpha}{3(\alpha-1)}} \cdot \left[1 + \mathrm{erf}\left(h_1 \cdot \sqrt{\frac{\alpha}{2(\alpha-1)(2\alpha-3)}}\right)\right] \cdot exp\left(-\frac{\alpha h_1^2}{2(\alpha-1)}\right) \right\}$ $h_1 = \frac{h}{\sqrt{m_0}}$; $\alpha = \frac{m_0 \cdot m_4}{m_2^2}$; $C_1 = \frac{\alpha}{2 \cdot \alpha - 3}$; $\alpha = 1{,}5 + k \cdot t$	(7)
$R_{пов}(\varphi) = R_{пов0} + \sum_{i=1}^{p} Q_k \cdot sin(k \cdot \varphi + \varphi_k)$	(8)
$\begin{cases} D(x) = \frac{D_{max}}{\sqrt{\left[m_д \cdot (x - x')\right]^s + 1}} \\ D(x) = \frac{D_{max}}{\sqrt{\varepsilon^2 \cdot T_n^s \cdot m_д \cdot (x - x') + 1}} \end{cases}$	(9)

В формулах таблицы 1 использованы следующие условные обозначения: $\rho_{см}$ – удельное сопротивление смазочной плёнки; $r_к$ – радиус пятна контакта; h_0 – минимальное значение толщины смазочной плёнки в пределах пятна контакта; $\rho_м$ – удельное сопротивление материалов контактирующих поверхностей; $r_{пр}$, $r_{поп}$ – соответственно, радиусы закругления вершин неровностей в продольном и поперечном направлениях (параметры шероховатости); β – радиус закругления единичной неровности; δ – сближение поверхностей ($\delta = h - d$); $^{L(d/R_q)}$ – функция Лапласа (табулирована); $A_Д$ – площадь локального дефекта; A_c – контурная площадь контакта поверхностей; S_{m1}, S_{m2} – средний шаг неровностей профиля в перпендикулярных сечениях (продольном и поперечном); R_p – приведенная высота сглаживания неровностей профиля поверхностей ($R_p = R_{p1} + R_{p2}$); N – число всех неровностей, находящихся в пределах номинальной площади контакта A_a двух поверхностей трибосопряжения; d – номинальный зазор между поверхностями; E и η – соответственно, приведенные модуль упругости и коэффициент Пуассона; F_r – нормальная нагрузка в контакте; $(2K/\pi n_a)$ – табличный коэффициент; $\Sigma\rho$ – сумма главных кривизн контактирующих поверхностей, определяемая по радиусам их кривизны; h и h_1 – соответственно, высота микронеровностей и безразмерная высота микронеровностей; α – параметр широкополосности профиля поверхности; C_1 – коэффициент пропорциональности; m_0, m_2, m_4 – моменты спектральной плотности высоты микронеровностей профиля поверхности; k – коэффициент пропорциональности; t – срок эксплуатации

поверхности (детали); $R_{пов0}$ – средний радиус сечения; Q_k , φ_k – амплитуда и фазовый угол k-й гармоники отклонения; k – номер гармоники (первая гармоника характеризует эксцентриситет, вторая – овальность, третья – трехвершинную огранку и т.п.); p – предельный номер учитываемой гармоники; s, ε – коэффициенты, определяющие профиль дефекта; D_{max}, $m_д$ и x'– соответственно, параметры глубины, протяженности и смещения локального дефекта; $T_n(x)$ – полином Чебышева степени n с аргументом $m_д(x–x')$.

Выражения (1) – (9) позволяют составить математическое описание электрического сопротивления отдельного фрикционного контакта в подшипнике. Для получения математической модели сопротивления всего подшипника необходимо учитывать его электрическую схему замещения, то есть вклад отдельных контактов в общее сопротивление [4].

В отличие от известных математических моделей, разработанная модель позволяет получить дифференциальную функцию распределения сопротивления как комбинацию функций распределения фактической площади контакта и числа вероятных контактов с учётом особенностей контактирования тела качения с наружным и внутренним кольцами. В практических расчётах использована числовая характеристика дифференциальной функции распределения сопротивления – её математическое ожидание. Подробное описание математической модели представлено в работе [16].

Результаты теоретических исследований

Цель исследований – изучение влияния шероховатости и различных по виду, значению и ориентации отклонений формы и расположения дорожек качения колец работающего подшипника на характер изменения параметров функции его электрического сопротивления.

На основе математической модели разработана прикладная программа численного расчета детерминированной составляющей сопротивления (R) при различных значениях влияющих факторов. Для обеспечения универсальности получаемых результатов выходным параметром программы является зависимость R от угловой координаты сепаратора ψ (при равномерном вращении эквивалентно функции сопротивления от времени $R(t)$).

Объекты исследований – радиальные шариковые подшипники сверхлегкой серии 1000900 при частоте вращения кольца n = 1500 мин$^{-1}$, радиальной нагрузке F_r = 100 Н, и смазочном материале – масло трансформаторное; подшипники средней серии 306 при F_r = 3000 Н и n = 900 мин$^{-1}$ с пластичным смазочным материалом (ПСМ) Литол-24.

Исследование влияния шероховатости дорожек качения колец подшипника на параметры функции его электрического сопротивления. Изменение параметра R_a шероховатости тел и дорожек качения вызывает значительные

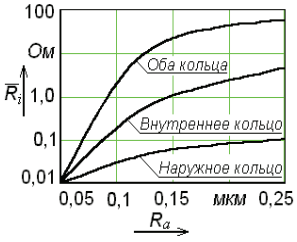
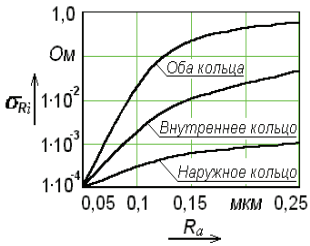
изменения абсолютных числовых характеристик функции $R(\psi)$, например её среднего $\overline{R}$ и среднеквадратического σ_R значений.

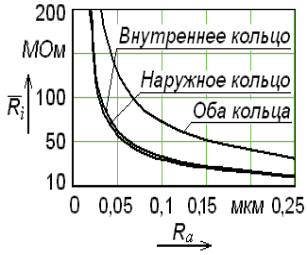
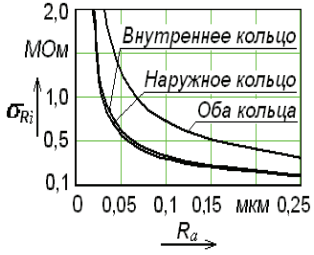
В таблице 2 показаны графики расчётных функций параметров $\overline{R_i}(R_a)$ и $\sigma_{Ri}(R_a)$ (соответственно, среднего сопротивления и среднеквадратического значения переменной составляющей функции сопротивления), полученные для подшипника типа 306 (при нормальной нагрузке $F_r = 3000$ *Н*).

На графиках показано по три кривых, соответствующих изменению параметров $\overline{R_i}$ и σ_{Ri} при контакте тела качения с наружным кольцом, с внутренним кольцом, и при контакте с двумя кольцами. Такая структура позволяет выявлять особенности изменения параметров в каждом из случаев.

Анализ функций $\overline{R_i}(R_a)$ и $\sigma_{Ri}(R_a)$ показывает, что значения числовых характеристик функции распределения сопротивления контакта тела качения с кольцами зависят от шероховатости их поверхностей, а характер изменения функций зависит от вида смазки в подшипнике. При граничной смазке значения параметров $\overline{R_i}$ и σ_{Ri} резко возрастают с увеличением параметра R_a. Это объясняется тем, что с увеличением высоты отдельных микронеровностей уменьшаются значения фактической площади контакта и числа вероятных контактов. При смешанной и жидкостной смазках значения параметров $\overline{R_i}$ и σ_{Ri} убывают с увеличением R_a. Это объясняется тем, что при отсутствии высоких микронеровностей на поверхностях тел и дорожек качения среднее значение толщины смазочной плёнки будет большим, чем при наличии отдельных микронеровностей большой высоты.

Таблица 2 – Графики расчетных функций $\overline{R_i}(R_a)$ и $\sigma_{Ri}(R_a)$

Вид смазки	Вид параметра	
	$\overline{R_i}(R_a)$	$\sigma_{Ri}(R_a)$
Граничная смазка		

Смешанная и жидкостная смазка		

Степень влияния шероховатости тел и дорожек качения также зависит от вида смазки. При граничной смазке графики функций $\overline{R_i}(R_a)$ и $\sigma_{Ri}(R_a)$ для случаев контакта тела качения с внутренним и наружным кольцами значительно отличаются. При смешанной и жидкостной смазках графики этих функций практически одинаковы. Это можно объяснить тем, что в первом случае сопротивление контакта определяется, в первую очередь, сближением поверхностей, а во втором – толщиной смазочной пленки, значение которой в меньшей степени зависит от сближения [3, 4].

Исследование характера изменения сопротивления подшипника при его работе в условиях отсутствия отклонений формы и расположения поверхностей. Установлено, что сопротивление работающего подшипника периодически изменяется даже при «идеальных» не имеющих отклонений формы рабочих поверхностях деталей. На рисунке 1, *а* и *б* (фрагменты с $Q = 0$ мкм) представлены примеры типовых зависимостей $R(\psi)$ для этого случая.

Выявленный характер $R(\psi)$ обусловлен периодически повторяющимися процессами перемещения тел качения относительно вектора нормальной нагрузки F_r, перераспределения нагрузки между ними и соответствующего изменения толщины смазочных слоев в зонах трения. Отметим, что зависимость $R(\psi)$ близка к синусоидальной и содержит только одну ярко выраженную гармоническую составляющую на частоте $f_н$ (несущей частоте) прохождения тел качения через линию действия F_r (гармоника $k = 16$ на рисунке 2, *в*, где W_R – амплитуда гармоник):

$$f_н = f_к \cdot z, \tag{10}$$

где $f_к$ – частота вращения кольца;

z – число тел качения в подшипнике.

Исследование влияния отклонений формы и расположения дорожки качения местно нагруженного кольца подшипника на функцию изменения его сопротивления. При исследовании влияния радиального биения, овальности и огранки различных порядков дорожки качения местно нагруженного кольца подшипника на $R(\psi)$ установлено, что независимо

от вида отклонения формы или расположения поверхности характер влияния его значения на $R(\psi)$ идентичен и зависит от ориентации данного отклонения относительно направления действия F_r (на рисунке 1, *а* и *б* представлены примеры зависимостей $R(\psi)$ для различных значений Q радиального биения при двух значениях угла ϕ между направлением вектора F_r и Q). Установлено, что увеличение Q приводит к характерному изменению состояния смазки в подшипнике, что согласуется с данными работы [17], и, соответственно, среднего сопротивления $\overline{R}$ при неизменности спектрального состава функции $R(\psi)$ (при $\phi = 0$ значение $\overline{R}$ возрастает, что свидетельствует об улучшении состояния смазки, а при $\phi = \pi$ значение $\overline{R}$ убывает – состояние смазки ухудшается).

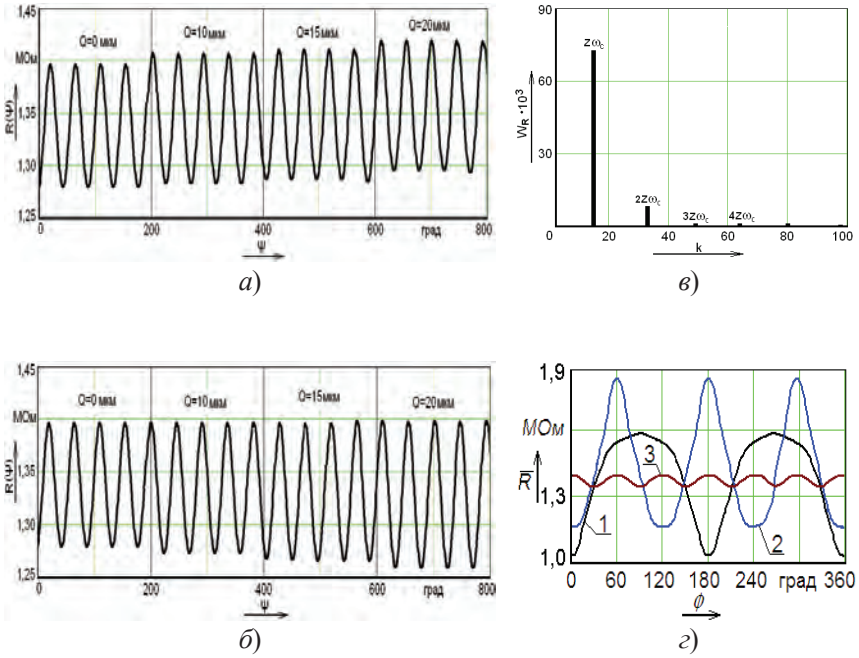


Рисунок 1 – Результаты теоретического исследования влияния отклонений формы и расположения дорожки качения местно нагруженного кольца на сопротивление подшипника типа 1000900: *а*, *б* – функции $R(\psi)$ при радиальном биении дорожки качения, соответственно, в условиях $\phi = 0$ и $\phi = \pi$; *в* – результаты гармонического анализа $R(\psi)$ при $Q = 0$; *г* – зависимости $\overline{R(\phi)}$, 1 – овальность дорожки качения, 2 – огранка 3-вершинная, 3 – огранка 6-вершинная

Аналогичные исследования, выполненные с другими значениями ϕ, выявили периодичность функции $\overline{R}(\phi)$, которая имеет доминирующую гармоническую составляющую, соответствующую виду доминирующего отклонения формы или расположениядорожки качения местно нагруженного кольца: для радиального биения – первая гармоника, для овальности дорожки качения – вторая, для трёхвершинной огранки – третья и т.д. (на рисунке 1, *г* представлены примеры графиков $\overline{R}(\phi)$ для овальности, трёх- и шестивершинной огранок дорожки качения местно нагруженного кольца подшипника).

Полученный результат показывает, что для оценки отклонений формы и расположения дорожки качения местно нагруженного кольца подшипника в качестве диагностических параметров целесообразно использовать параметр $\overline{R}$, амплитуды и фазы соответствующих гармоник функции $\overline{R}(\phi)$. При этом вид доминирующего отклонения формы или расположения определяется номером доминирующей гармоники в спектре функции, ориентация – фазой гармоники, а усреднённая оценка состояния подшипника осуществляется по параметру $\overline{R}$.

Исследование влияния отклонений формы и расположения дорожки качения циркуляционно нагруженного кольца подшипника на сопротивление. При исследовании влияния радиального биения, овальности и огранки различных порядков дорожки качения циркуляционно нагруженного кольца подшипника на вид и характеристики функции $R(\psi)$ (на рисунке 2 показан пример зависимостей для радиального биения, а на рисунке 3 – примеры зависимостей для овальности), установлено, что введение и увеличение значения отклонения формы дорожки качения приводит к ухудшению состояния смазки в подшипнике, выражаемому снижением толщины смазочных слоёв в зонах трения (уменьшается значение параметра $\overline{R}$) и увеличением флуктуаций этой толщины (возрастание среднего квадратического значения переменной составляющей σ_R функции сопротивления) (рисунок 3, *а-в*).

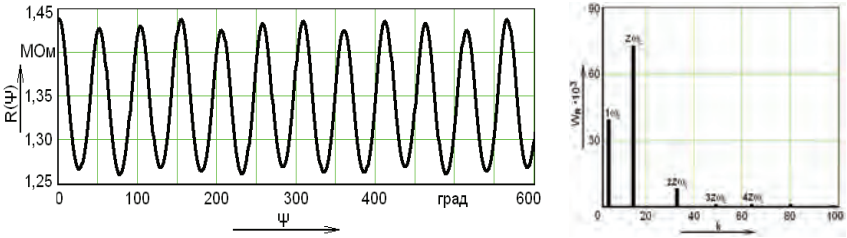
Кроме того, отклонения формы и расположения дорожки качения приводят к формированию в спектре функции $R(\psi)$ набора гармонических составляющих (рисунок 2, *б* и рисунок 3, *г*) с характерными для конкретного вида отклонения формы или расположения информационными частотами $f_и$:

$$\begin{cases} f_и = f_к \cdot M; \\ f_и = f_с \cdot z + f_к \cdot M \cdot L, \end{cases} \tag{11}$$

где $f_с$ – частота вращения сепаратора;

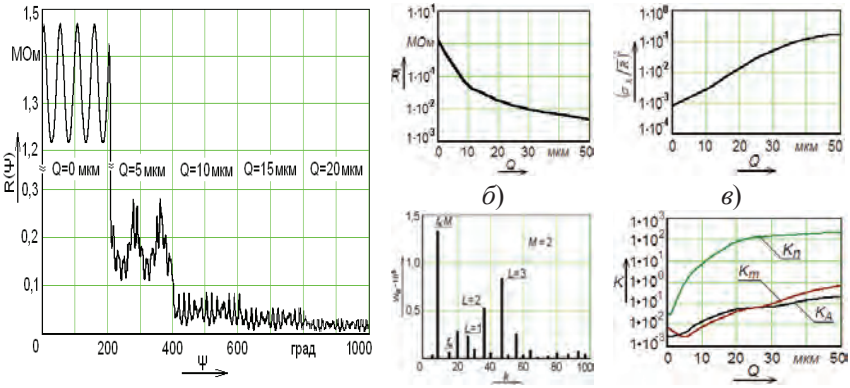
M – коэффициент, равный 1 – для радиального биения дорожки качения, 2 – для овальности и 3, 4, … – для огранки соответствующего порядка;

L – коэффициент, равный 1, 2 или 3.



а) *б*)

Рисунок 2 – График функции $R(\psi)$ (*а*) и результаты её гармонического анализа (*б*) при радиальном биении амплитудой 10 мкм дорожки качения циркуляционно нагруженного кольца подшипника типа 1000900



а) *г*) *д*)

Рисунок 3 – Результаты теоретического исследования влияния овальности Q дорожки качения циркуляционно нагруженного кольца на сопротивление подшипника типа 1000900: *а* – графики функции $R(\psi)$ при различных значениях овальности дорожки качения; *б*, *в* – зависимости $\overline{R}$ (Q) и $(\sigma_R/\overline{R})^2$; *г* – результаты гармонического анализа $R(\psi)$ при $Q = 40$ мкм; *д* – зависимости параметров K_A, K_m и K_n от овальности Q дорожки качения кольца ($M = 2$, $L = 3$)

Установлено также, что изменение значения отклонений формы не изменяет спектрального состава функции $R(\psi)$, а лишь перераспределяет весомость отдельных гармонических составляющих. Это создало предпосылки для разработки метода выделения информации при диагностировании о виде и значении доминирующего отклонения формы дорожки качения циркуляционно нагруженного кольца. В качестве диагностических параметров предложены: $\overline{R}$; $(\sigma_R/\overline{R})^2$; K_A – отношение амплитуды гармонической составляющей на частоте $f_и$ к $\overline{R}$; K_m – отношение квадрата

среднеквадратического значения гармонической составляющей на частоте $f_и$ к квадрату среднеквадратического значения переменной составляющей функции сопротивления; K_n – отношение квадрата среднеквадратического значения гармонической составляющей на частоте $f_и$ к квадрату среднеквадратического значения гармонической составляющей на частоте $f_н$. Представленные на рисунке 3, *д* зависимости показывают их монотонный характер и позволяют отметить, что среди параметров K_A, K_m и K_n наиболее чувствительным является параметр K_n.

Результаты теоретических исследований послужили основой для разработки метода неразрушающего контроля собранной опоры качения по параметрам функции электрического сопротивления подшипника, при котором вид доминирующего отклонения формы или расположения дорожки качения циркуляционно нагруженного кольца определяется по информационным частотам гармонических составляющих функции сопротивления, значения отклонения оценивается по значениям параметров K_A, K_m или K_n, а усредненная комплексная оценка состояния подшипника – по параметрам $\overline{R}$ и $(\sigma_R/\overline{R})^2$.

Содержание метода контроля

В основе разработанного метода контроля качества сборки опоры качения по параметрам электрического сопротивления подшипника лежат результаты теоретических исследований. Их обобщение позволило сформулировать следующие *положения физического принципа контроля*:

– при работе радиально нагруженного подшипника качения вследствие вращения сепаратора в зону нагружения последовательно попадают различные тела качения, и происходит непрерывное перераспределение нагрузки между ними, что приводит к периодическому изменению электрического сопротивления подшипника;

– изменения макрогеометрии дорожек качения подшипника (например, радиальное биение, овальность, огранка) приводят к изменению вида функции его электрического сопротивления. При этом, наряду с изменением интегральных числовых характеристик функции электрического сопротивления во времени (среднее и среднеквадратическое значения), изменяются числовые характеристики функции в частотной области (в спектре электрического сигнала появляются характерные гармонические составляющие);

– значения интегральных числовых характеристик функции электрического сопротивления зависят от вида и величины отклонений формы и расположения дорожек качения обоих колец подшипника и от ориентации отклонений кольца, испытывающего местное нагружение;

– амплитуды и частоты гармонических составляющих функции сопротивления подшипника зависят от вида и значения отклонений формы и расположения дорожек качения циркуляционно нагруженного кольца;

– с изменением шероховатости все составляющие функции электрического сопротивления подшипника изменяются в равной степени, при этом между абсолютными спектральными характеристиками функции сопротивления подшипника, её средним и среднеквадратическим значениями с одной стороны, и приведённым параметром шероховатости с другой стороны, существует функциональная зависимость.

Для реализации электрорезистивного метода неразрушающего контроля качества сборки опоры качения разработан ряд методик, представляющих собой совокупность мероприятий по созданию условий, необходимых для формирования сигнала измерительной информации и мероприятий по измерению и обработке этого сигнала. Методики контроля позволяют выполнять усредненную комплексную оценку состояния подшипника в опоре качения с учётом шероховатости тел и дорожек качения, а также определять вид, оценивать значение и ориентацию доминирующего отклонения формы или расположения дорожки качения каждого из колец при работе подшипника в опоре качения для различных условий смазки.

Контроль предлагается осуществлять в два этапа:

1) этап усредненной комплексной оценки технического состояния подшипника;

2) этап определения вида, оценки значения и ориентации отклонения формы или расположения, доминирующего на дорожке качения.

Методика усредненной комплексной оценки состояния подшипника по интегральным параметрам включает в себя следующие действия:

– подготавливают контролируемый подшипник к сборке опоры в соответствии с регламентированной процедурой (как правило, промывают и смазывают требуемым количеством смазочного материала заданного состава);

– устанавливают подшипник в реальную опору качения, задают конкретные режимы и условия работы подшипника в опоре (привод соответствующего кольца с заданной частотой, требуемый характер нагружения);

– измеряют диагностический параметр $\overline{R}$ или $(\sigma_R / \overline{R})^2$;

– анализируя значения параметра, определяют условия смазки;

– принимают решение о пригодности подшипника сравнением измеренного значения параметра с допустимым для данного условия смазки.

Достоинствами данной методики является простота реализации процесса измерения и относительно невысокая сложность средств контроля, а также возможность реализации практически при любых условиях смазки.

Методика контроля отклонений формы или расположения дорожки качения циркуляционно нагруженного кольца, состоит из действий:

– кольца установленного в опоре качения подшипника включают в измерительную цепь, позволяющую регистрировать функцию *R(t)*;

– проводят гармонический и статистический анализ функций;

– анализируя порядок значений функции *R(t)*, определяют условия смазки и измеряют параметр K_n на заданной информационной частоте;

– определяют вид основного отклонения формы или расположения сравнением значений K_n для составляющих на информационных частотах;

– оценивают значение основного отклонения формы или расположения по значению диагностического параметра K_n.

Достоинством данной методики контроля является возможность определения вида и оценки значения отклонения формы или расположения дорожки качения циркуляционно нагруженного кольца подшипника.

Методики контроля вида и ориентации отклонений формы или расположения дорожки качения местно нагруженного кольца, следующая:

– кольца установленного в опоре качения подшипника включают в измерительную цепь, позволяющую определять параметр $\overline{R}$;

– контролируемое кольцо условно разбивают на *n* участков;

– получают *n* отсчётов параметра $\overline{R}$, каждый из которых измеряют, совмещая направление вектора нагрузки F_r с центром каждого из участков;

– строят функцию измеренных значений параметра $\overline{R}$ от угловой координаты вектора F_r и проводят её гармонический анализ;

– определяют вид основного отклонения формы или расположения дорожки качения кольца по виду спектра функции и оценивают его ориентацию путем анализа координат экстремумов соответствующей гармоники.

Достоинством данной методики является возможность определения вида и ориентации отклонений формы или расположения дорожки качения местно нагруженного кольца в широком диапазоне изменения возможных значений отклонений, что является весьма важной задачей.

Проведенные теоретические исследования влияния внешних факторов на значения диагностических параметров позволили обосновать рекомендации по рациональному выбору режимов контроля (нормальная нагрузка, частота вращения).

Например, при контроле подшипников, типоразмерами соизмеримыми с подшипником типа 1000900, по параметру $\left(\sigma_R/\overline{R}\right)^2$ в условиях смешанной смазки рационально выбирать значение F_r >50 *Н*. С увеличением F_r чувствительность метода контроля возрастает. При оценке вида и значения отклонений формы дорожки качения по параметрам K_A, K_m и K_n также можно рекомендовать указанный диапазон изменения нагрузки.

Результаты экспериментальных исследований и их обсуждение

Цель исследований – подтверждение достоверности результатов теоретических исследований, обоснованности предложенных принципов выделения информации о состоянии реальной макрогеометрии дорожек качения колец подшипника по параметрам его электрического сопротивления.

Экспериментальное оборудование – многофункциональный механический стенд и электронная диагностическая аппаратура, разработанные на кафедре «Приборостроение, метрология и сертификация» Госуниверситета-УНПК [18]. Механический стенд предназначен для привода и нагружения подшипника и обеспечивает возможность моделирования отклонений формы и расположения дорожек качения каждого из колец при их местном или циркуляционном нагружении. В состав электронной аппаратуры входит автоматизированное устройство измерения, регистрации и обработки значений сопротивления подшипника на базе персонального компьютера.

Объекты исследований – радиальные шариковые подшипники типа 1000900, смазанные смазочными материалами с различным агрегатным состоянием и типичными антифрикционными свойствами: жидкие (трансформаторное масло); полужидкие (трансмиссионное масло ТАД-17); пластичные (Литол-24); смазочные материалы с присадками (графитная смазка).

Подготовка объектов – перед каждым экспериментом подшипник промывался в авиационном керосине, высушивался в течение 20 ч и прирабатывался в течение 2 ч.

Режимы работы подшипника: F_r = 100 Н; объём смазочного материала 16-24 мм^3; n = 1500 мин$^{-1}$ (при исследовании местно нагруженного кольца подшипника); n = 730 мин$^{-1}$ (при исследовании циркуляционно нагруженного кольца); параметр $\overline{R}$ усреднён по 50 отсчётам.

Результаты подтверждения достоверности теоретических исследований, выполненных для дорожек качения местно нагруженных колец подшипников.

Исследовались зависимости $\overline{R}(Q)$ для различных видов макроотклонений и типов смазочных материалов. Полученные экспериментально данные (на рис. 4, *а* и рис. 4, *б* представлены примеры диаграмм для овальности Q дорожки качения при $\phi = 90^0$) подтверждают установленный теоретически монотонный характер зависимостей $\overline{R}(Q)$, доказывают информативность параметра $\overline{R}$ при усредненной комплексной оценке состояния подшипника.

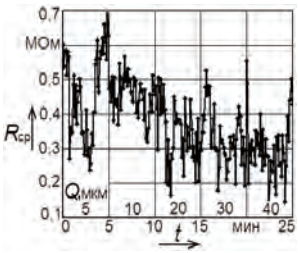
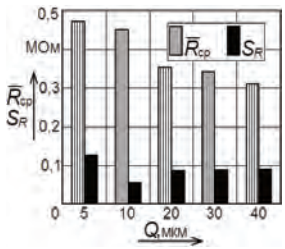
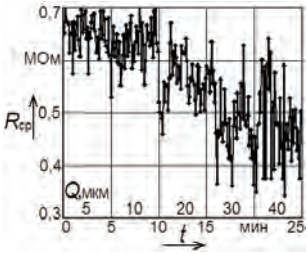
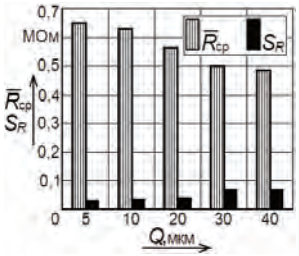
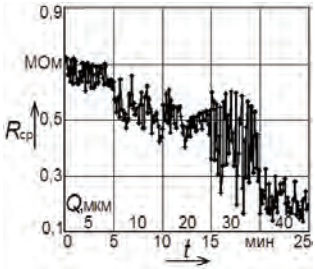
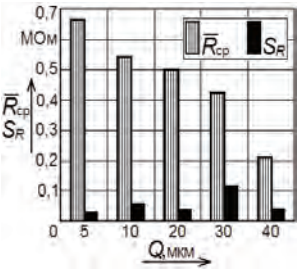
В таблице 3 представлены результаты экспериментальных исследований влияния овальности дорожки качения наружного кольца испытуемого подшипника на значения диагностического параметра «среднее электрическое сопротивление» – параметр $\overline{R}$. Результат усреднён по 50 отсчётам для каждого значения овальности. Статистическая обработка результатов измерений диагностического параметра $\overline{R}$ включала расчёт его среднего арифметического значения ($\overline{R}_{\text{ср}}$) и среднеквадратического отклонения (S_R) для каждого значения овальности (Q) наружного кольца подшипника.

В таблице 4 представлены зависимости электрорезистивного диагностического параметра $\overline{R}(\phi)$, полученные при моделировании овальности Q = 10 мкм дорожки качения местно нагруженного кольца подшипника при использовании перечисленных выше смазочных материалов. Зависимости имеют явно выраженную доминирующую гармоническую составляющую –

вторую гармонику и соответствуют теоретической зависимости $\overline{R}(\phi)$ для овальности (кривая 1 на рисунке 1, *г*).

Полученные результаты подтверждают достоверность проведённых теоретических исследований влияния отклонений формы и расположения дорожек качения колец подшипника, собранного в опоре качения, на диагностические параметры, представляющие собой числовые характеристики функции электрического сопротивления подшипника.

Таблица 3 – Результаты экспериментальных исследований

Смазочный материал	**Измеряемый параметр**	
	Параметр $\overline{R}$	Статистические показатели
Масло трансформаторное		
Масло трансмиссионное ТАД-17		
Литол-24		
Графитная		

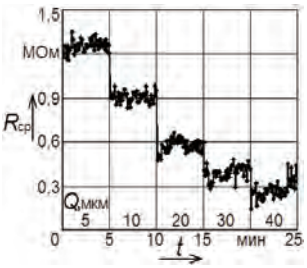
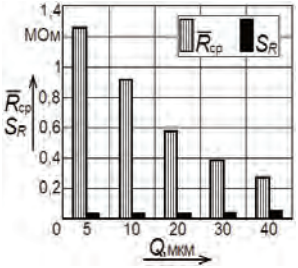
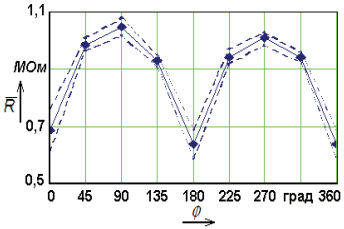
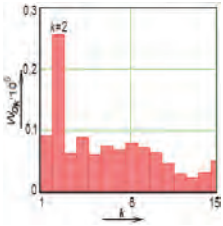
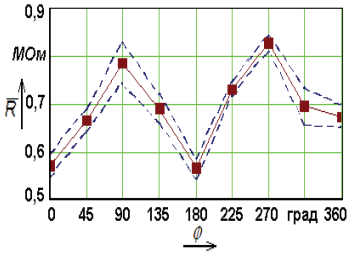
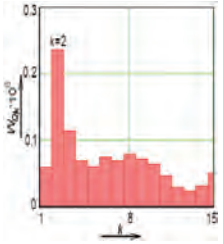
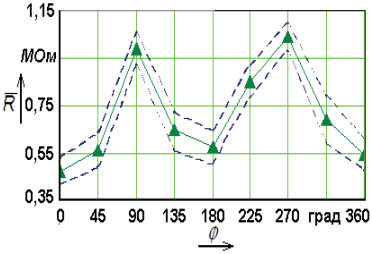
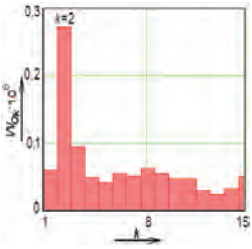
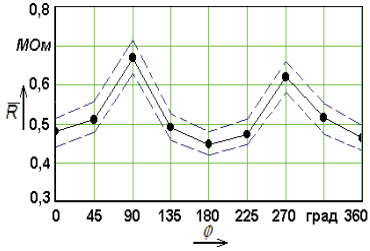
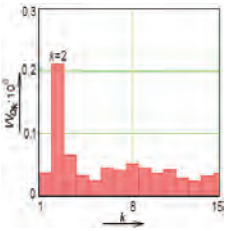
смазка		

Таблица 4 – Графики функции $\overline{R}(\varphi)$
и результаты их гармонического анализа

Смазочный материал	График функции $\overline{R}(\varphi)$	Результат гармонического анализа
Масло трансформаторное		
Масло трансмиссионное ТАД-17		
Литол-24		

Графитная смазка		

Результаты подтверждения достоверности теоретических исследований, выполненных для циркуляционно нагруженных колец подшипников. Исследовались зависимости $\overline{R}(Q)$ для различных видов отклонений формы и типов смазочных материалов. На рисунке 4, в качестве примера, представлены диаграммы для овальности Q дорожки качения кольца подшипника, смазанного трансформаторным маслом. Полученные данные подтверждают теоретические зависимости $\overline{R}(Q)$, приведённые выше.

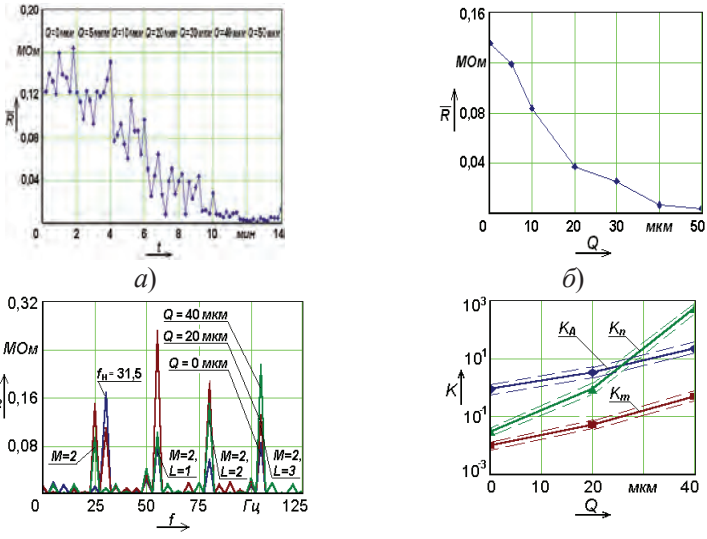


Рисунок 4 – Результаты экспериментальных исследований зависимостей диагностических параметров от овальности Q дорожки качения циркуляционно нагруженного кольца подшипника: *а* – изменение параметра $\overline{R}$ во времени; *б* – диаграмма зависимости $\overline{R}(Q)$; *в* – спектры функции $R(t)$; *г* – диаграммы зависимостей параметров $K_д(Q)$, $K_m(Q)$ и $K_п(Q)$

На рисунке 5 показан фрагмент спектрограммы функции сопротивления подшипника, результаты обработки которой представлены на рисунке 4.

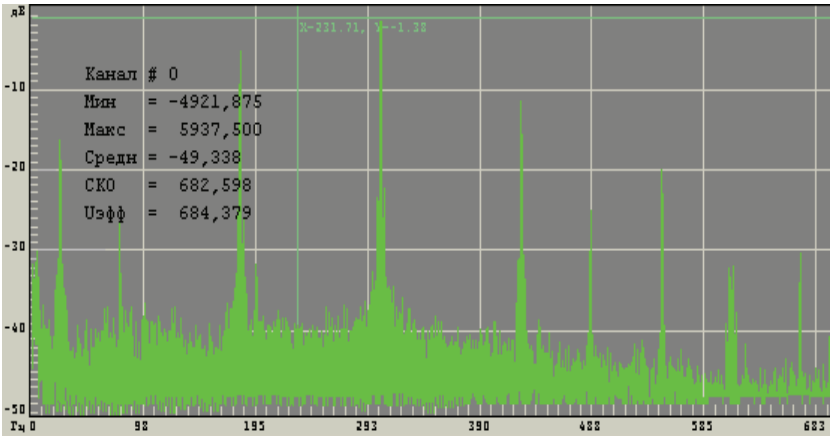


Рисунок 5 – Спектр функции *R(t)* для овальности (Q = 10 мкм) циркуляционно нагруженного наружного кольца подшипника типа 1000900

Установленный экспериментально монотонный характер исследуемых зависимостей показывает, что отклонения формы на дорожке качения циркуляционно нагруженного кольца приводят к ухудшению состояния смазки в подшипнике. Спектральный анализ функции $R(t)$ показал, что отклонения формы дорожки качения циркуляционно нагруженного кольца вызывают формирование в её спектре информационных гармонических составляющих. Каждому виду отклонений формы соответствует характерный только для него набор информационных составляющих. Изменение значения отклонения формы лишь перераспределяет весомость составляющих, а их информационные частоты, определяемые из выражения (11), остаются неизменными.

Сделанный вывод подтверждается графиками экспериментальных зависимостей, показанных на рисунке 4, *в*, которые получены для подшипника с овальностью дорожки качения в диапазоне от 0 до 40 мкм при частотах вращения кольца $f_к$ = 12,14 Гц и сепаратора f_c = 4,5 Гц. Наряду с несущей частотой $f_н$=31,5 Гц (формула 10), при разной овальности в спектре доминирующими являются частотные составляющие (по формуле 11): 24,3 Гц (M = 2), 55,8 Гц (M = 2, L = 1), 80,1 Гц (M = 2, L = 2) и 104,4 Гц (M = 2, L = 3).

Экспериментальные зависимости диагностических параметров $K_A(Q)$, $K_m(Q)$ и $K_n(Q)$ (рисунок 4, *г*) также подтверждают результаты теоретических исследований (рисунок 3, *д*) и наибольшую чувствительность параметра K_n.

Полученные результаты подтверждают достоверность теоретических исследований и работоспособность метода неразрушающего контроля качества сборки опоры качения по параметрам сопротивления подшипника.

Выводы

1 Регулярные отклонения формы и расположения рабочих поверхностей деталей подшипника качения в виде радиального биения, овальности или огранки оказывают влияние на состояние смазки в зонах трения.

2 Электрическое сопротивление подшипника изменяется во времени, функция $\overline{R}(t)$ имеет детерминированную составляющую, несущую данные о виде, значении и ориентации отклонений формы и расположения дорожек качения колец и может использоваться в качестве диагностического признака.

3 Для усредненной комплексной оценки качества сборки опоры качения и состояния подшипника в данной опоре рекомендуется использовать диагностические параметры $\overline{R}$ и $(\sigma_R/\overline{R})^2$.

4 Для оценки вида и ориентации доминирующего отклонения формы или расположения дорожки качения местно нагруженного кольца в качестве диагностических параметров рекомендуется использовать амплитуды гармонических составляющих функции $\overline{R(\phi)}$ (для радиального биения – первая гармоника, для овальности – вторая, 3-вершинной огранки – третья и т.п.).

5 Для выявления вида и оценки значения доминирующего отклонения формы дорожки качения циркуляционно нагруженного кольца в качестве диагностических параметров рекомендуется использовать коэффициенты K_A, K_m и K_n, определяемые на частотах, соответствующих выражению (3); при этом параметр K_n является наиболее чувствительным к отклонениям формы.

6 Проведённые экспериментальные исследования подтвердили правильность теоретических положений, возможность и эффективность использования предложенных электрорезистивных параметров в качестве диагностических для проведения усредненной комплексной оценки качества сборки опоры качения, состояния подшипника в данной опоре с возможностью оценки вида, значения и ориентации доминирующего отклонения формы или расположения дорожек качения его колец.

Список использованной литературы:

1 Кеннел, Дж. Упругогидродинамическая смазка шарикового подшипника / Дж. Кеннел, Д. Снидекер // Тр. амер. о-ва инж.-мех. Сер. Проблемы трения и смазки. – 1976. – №2 – С. 57-63.

2 Tallian, T.E. Rolling bearing life modifying factors for film thickness, surface roughness and friction / T.E.Tallian // J. Lubr. Technol. – 1981. – V. 103. – P. 509-520.

3 Корндорф, С.Ф. Оценка состояния смазки в узлах трения электрофлуктуационными методами / С.Ф. Корндорф, К.В. Подмастерьев // Трение и износ. – 1989. – Т. 10. – №4. – С. 642-648.

4 Подмастерьев, К.В. Неразрушающий контроль: Справочник: в 8 томах. // К.В. Подмастерьев, Ф.Р. Соснин, С.Ф. Корндорф, Т.И. Ногачева, Е.В. Пахолкин, Л.А. Бондарева, В.Ф. Мужицкий; Под ред. В.В. Клюева. – Т. 5: книга 2: Электрический контроль. – М.: Издательский дом «Спектр», 2009. – 732 с.

5 Подмастерьев, К.В. Электрический метод и средства поиска локальных дефектов опор качения / К.В. Подмастерьев, Е.В. Пахолкин // Дефектоскопия. – 1998. – №2. – С. 59-67.

6 Санько, Ю.М. Диагностирование состояния подшипников по тепловым и электрическим параметрам / Ю.М. Санько, А.К. Петриков, Э.П. Дворникова, В.И. Рябинкин // Подшипниковая промышленность. – 1982. – №2. – С. 3-7.

7 Карасик, И.И. Оценка режима трения при несовершенной смазке по статистическим характеристикам электропроводности / И.И. Карасик, Н.П. Кукол // Трение и износ. – 1981. – Т. 2. – №3. – С. 451-458.

8 Мышкин, Н.К. Трибология. Принципы и приложения / Н.К. Мышкин, М.И. Петроковец. – Гомель: ИММС НАНБ, 2002. – 310 с.

9 Дёмкин, Н.Б. Теория контакта реальных поверхностей и трибология / Н.Б. Дёмкин // Трение и износ. – 1995. – Т. 16. – № 6. – С. 1003-1024.

10 Мышкин, Н.К. Контакт шероховатых тел и его проводимость / Н.К. Мышкин, М.И. Петроковец. // Трение и износ. – 1983. – Т. 4. – № 5. – С. 845-853.

11 Коднир, Д.С. Контактная гидродинамика смазки деталей машин / Д.С. Коднир // М.: Машиностроение, 1976. – 304 с.

12 Хусу, А.П. Шероховатость поверхностей, теоретико-вероятностный подход / А.П. Хусу, Ю.Р. Витенберг, В.А. Пальмов // Под ред. А.А. Первозванского. – М.: «Наука», 1975. – 344 с.

13 Дёмкин, Н.Б. Качество поверхности и контакт деталей машин / Н.Б. Дёмкин, Э.В. Рыжов. – М.: Машиностроение, 1981. – 244 с.

14 Марков, В.В. Методы и средства контроля, исследований и анализа смазочных материалов: результаты патентных исследований / В.В. Марков // Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии. – 2011. – № 5. – С. 121-130.

15 Ковалев, М.П. Расчет высокоточных шарикоподшипников / М.П. Ковалев, Н.З. Народецкий // 2-е изд. – М.: Машиностроение. – 1980. – 373 с.

16 Марков, В.В. Универсальная структурная модель трибосопряжения / В.В. Марков // Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии. – 2012. – № 2-4. – С. 31-40.

17 Билик, Ш.М. Макрогеометрия деталей машин / Ш.М. Билик. – М.: Государственное научно-техническое издательство машиностроительной литературы, 1962. – 275 с.

18 Мишин, В.В. Приборная база для комплексного диагностирования подшипников / В.В. Мишин, К.В. Подмастерьев, В.В. Марков //

Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии. – 2011. – №4. – С. 111-121.

© В.В. Марков, 2014

УДК 62

А.А. Нестеренко,
канд.техн.наук старший преподаватель
Кубанский государственный аграрный университет
г. Краснодар, Российская Федерация

ИНТЕНСИФИКАЦИЯ ТЕХНОЛОГИИ ПРОИЗВОДСТВА КОЛБАСНОЙ ПРОДУКЦИИ

В последние годы успехи научных исследований в области биотехнологии привели к разработке новых технологий, позволяющих ускорить производство сырокопченых колбас, улучшить их органолептические свойства и значительно повысить гарантию производства высококачественных продуктов. Одним из способов интенсификации технологического процесса сырокопченых колбас является использование стартовых культур [1, с. 66].

В ряде стран для производства сырокопченых колбас применяют различные бактериальные препараты Bactoferment 61, Duploferment H, Pokelferment 77, в их состав входят дентитрифицирующие микрококки и микроорганизмы, которые продуцируют молочную кислоту и улучшают образование и стабилизацию цвета, снижают содержание нитрита, улучшают качество и сокращают процесс изготовления колбас [2, с. 95, 3, с. 1018].

Проведенные исследования Никифоровой Л. Л. позволили разработать ускоренную технологию производства сырокопченых колбас с использованием пробиотических микроорганизмов в качестве стартовых культур [4, с. 230].

В.И. Шипулиным и Н.Д. Лупандиной был предложен метод интенсификации созревания и сушки сырокопченых колбас при помощи введения многофункционального модуля (МФМ). Результаты проведенных исследований позволили сделать заключение о комплексном использовании стартовых культур, глюконо-дельта-лактона и лактулозосодержащего препарата [5, с. 192, 6, с. 1130, 7, с. 32, 8, с. 216].

При разработке усовершенствованной технологии сырокопченых колбас нами ставились следующие задачи:

– интенсификация технологического процесса за счет ускорения созревания колбас;

– подавление нежелательной микрофлоры и ускорение роста стартовых культур;

– получение продукта с высоким качеством;

– применимость предлагаемых решений на любом предприятии без значительной подготовки.

Из литературных источников [7, с. 89, 9, с. 90, 10, с. 790] известно, что ЭМП НЧ может вызвать резонансные колебания биологической клетки и разрушить ее структуру, а при малой интенсивности колебаний – гармонизировать работу клетки.

Совместно с сотрудниками кафедры применения электрической энергии Кубанского государственного аграрного университета, было разработано устройство для обработки мяса и стартовых культур ЭМП НЧ (рис. 1), которое состоит из генератора импульсов и цепи управления. Цепь управления предназначена для управления тиристором VD10. Генератор импульсов состоит из источника низкочастотных электромагнитных колебаний и излучателя электромагнитных импульсов, в виде соленоида. В качестве источника излучений использован генератор униполярных треугольных импульсов, способных сгенерировать частоты в диапазоне 10-200 Гц [7, с. 85, 9, с. 80].

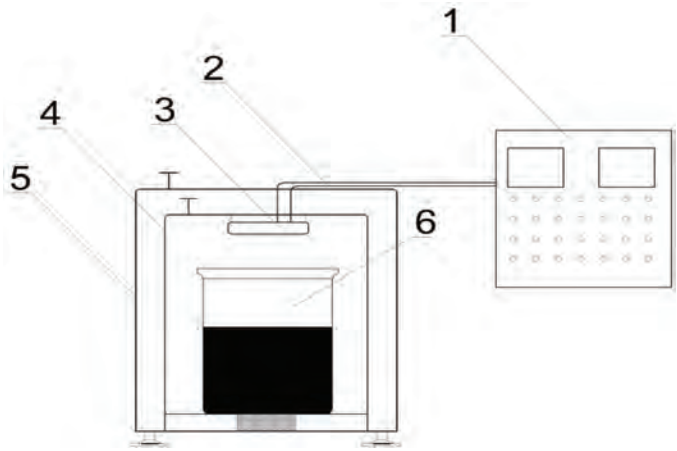


Рисунок 1 – Схема электромагнитной установки с экранированным контуром:

1 – блок управления; 2 – провод; 3 – катушка; 4 – 1-й защитный контур; 5 – 2-й защитный контур из феромагнита; 6 – обрабатываемый образец

Из литературных источников [7, с. 75, 9, с. 60] известно, что на интенсивность обработки имеют влияние многие факторы.

Для определения наиболее важных факторов, влияющих на обрабатываемый образец, нами была произведена их экспериментальная оценка (в баллах) и построена диаграмма Парето (рис. 2).

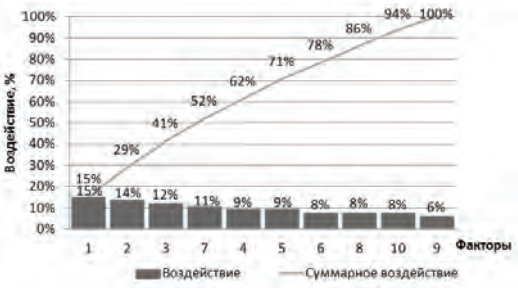


Рисунок 2 – Диаграмма Парето:
1 – частота сигнала, Гц; 2 – время обработки, мин; 3 – форма сигнала; 4 – расстояние до обрабатываемого образца, мм; 5 – размер излучателя, мм; 6 – площадь обрабатываемого объекта; 7 – толщина слоя обрабатываемого объекта; 8 – форма излучателя; 9 – количество витков излучателя; 10 – другие причины

Как видно из рисунка 2, наиболее существенными факторами являются частота сигнала и время обработки.

Для изучения влияния ЭМП НЧ на развитие мезофильных аэробных и факультативно-анаэробных микроорганизмов использовали говядину и свинину охлажденные. Образцы мясного сырья помещали в экранированную камеру с вмонтированным излучателем МП. На мясо генерировали сигнал в виде треугольной формы в диапазонах 10-110 Гц в течение 15, 30, 45 и 60 мин.

Установлено, что максимальный пик развития микрофлоры наступает при обработке ЭМП НЧ с частотой 45 Гц и продолжительностью 60 мин (КМАФАнМ КОЕ/г говядина охлажденная – $8{,}1 \cdot 10^7$, свинина охлажденная– $6{,}8 \cdot 10^7$) (рис. 3, 4). При дальнейшем увеличении частоты наблюдается значительное угнетение развития микрофлоры, пик которого является частота 100 Гц с продолжительностью 60 мин (КМАФАнМ КОЕ/г говядина охлажденная – $2{,}8 \cdot 10^2$, свинина охлажденная – $2{,}9 \cdot 10^2$) (рис. 5, 6).

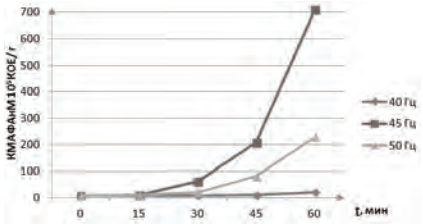


Рисунок 3 – Динамика изменения КМАФАнМ говядины от частоты 40 - 50 Гц и времени обработки ЭМП НЧ

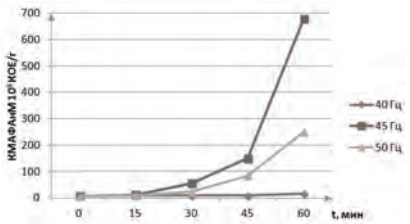


Рисунок 4 – Динамика изменения КМАФАнМ свинины от частоты 40 - 50 Гц и времени обработки ЭМП НЧ

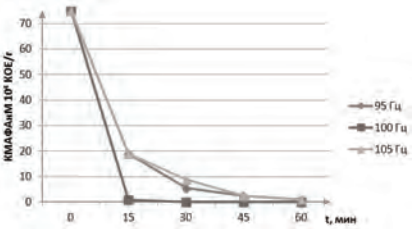


Рисунок 5 – Динамика изменения КМАФАнМ говядины от частоты 95 - 105 Гц и времени обработки ЭМП НЧ

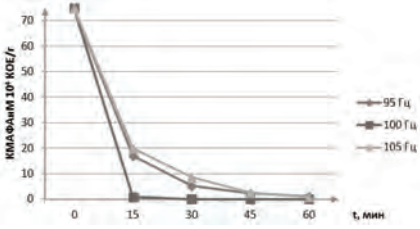


Рисунок 6 – Динамика изменения КМАФАнМ свинины от частоты 95 - 105 Гц и времени обработки ЭМП НЧ

При анализе результатов, полученных при обработке говядины и свинины с частотой 100 Гц видно, что различия показателей между временем обработки, начиная от 30 мин (КМАФАнМ КОЕ/г говядина охлажденная – $3{,}2 \cdot 10^2$, свинина охлажденная – $3{,}1 \cdot 10^2$) и заканчивая 60 мин (КМАФАнМ КОЕ/г говядина охлажденная – $2{,}8 \cdot 10^2$, свинина охлажденная – $2{,}9 \cdot 10^2$), не являются существенными. На основании полученных данных, определено производить обработку мясного сырья с частотой 100 Гц и продолжительностью 30 мин для интенсификации роста стартовых культур, предложено активировать их с частотой 45 Гц и продолжительностью 60 мин.

По результатам исследования зависимости развития КМАФАнМ от частоты и времени электромагнитной обработки, были построены математические модели в виде формул множественной регрессии. Уравнение регрессии для говядины имеет вид $Y=-31658X_1+102466X_2+279665$ (R^2-0,905), для свинины – $Y=-27527X_1+90301X_2+268938$ (R^2-0,910); где X_1 – частота обработки, Гц; X_2 – продолжительность обработки, мин;Y – КМАФАнМ КОЕ/г. Для нахождения неизвестных постоянных a_1,a_2, b был использован метод наименьших квадратов. Эти уравнения позволяют сделать вывод об однотипности процессов, протекающих при обработке говядины и свинины охлажденных.

Известно [11, с. 42, 12, с. 225, 13, с. 78], что действию электромагнитных волн в первую очередь подвергаются мембраны, ограничивающие различные внутриклеточные компоненты. Отдельные структурные элементы клетки имеют жидкокристаллическое строение. В связи с этим для них будет характерна анизотропия магнитных свойств. Полученные результаты позволяют считать, что жидкие кристаллы таких элементов ориентируются под влиянием магнитного поля, являясь ответственными за проницаемость мембраны, которая, в свою очередь, регулирует биохимические процессы, происходящие внутри клетки [7, с. 99, 9, с. 100].

Результаты исследования спектров фотонов, отраженных от продукта обработки, показывают, что при частоте сигнала равной 100 Гц обеззараживающий эффект максимален. Учитывая, что резонанс наступает при

совпадении амплитуд колебаний, то это возможно при кратном соотношении собственных частот колебаний электронов и частот внешнего воздействия, поэтому частота воздействия должна быть целым числом. Цвет отраженного сигнала голубой, это значит, что длины волн, излучаемых фотонов, равны целым числам и изменяется в интервале $6{,}0 \cdot 10^{14}$-$7{,}0 \cdot 10^{14}$ Гц. Из этого следует, что при воздействии частотой 100 Гц и продолжительностью 30 мин, происходит резонанс внешних частот ЭМП НЧ и внутренних частот.

В целях определения безопасного расстояния до излучателя, действие ЭМП НЧ с частотами 45 и 100 Гц изучали на культуре Escherichia coli, в физиологическом растворе, помещенной в экранированную камеру и на расстояниях 0,5; 1,0; 1,5 и 2,0 м от излучателя (Рис. 7,8).

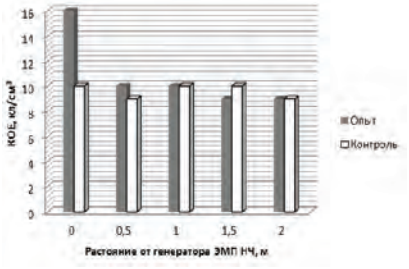


Рисунок 7 – Влияние воздействия ЭМП НЧ с частотой 45 Гц на культуру Escherichia coli внутри и снаружи прибора

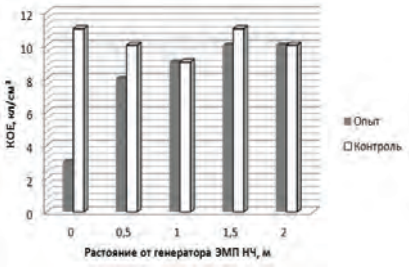


Рисунок 8 – Воздействие ЭМП НЧ с частотой 100 Гц на культуру Escherichia coli внутри и снаружи прибора

Установлено, что при воздействии ЭМП НЧ с частотой 45 Гц и продолжительностью 60 мин в образце, находящемся под излучателем, наблюдался активный рост численности колоний, в образце, находившемся на расстоянии 0,5 м от излучателя, рост числа колоний резко уменьшился, а при расстояниях от 1,0 до 2,0 м - значительных изменений в числе колоний не наблюдалось. При анализе электромагнитного излучения (прибор «Импульс» фирмы Soeks), в контрольных точках были зафиксированы следующие показатели: на расстоянии 0,5 м от излучателя – 9,56 мкТл; 1 ,0 м – 5,10 мкТл; 1,5 м – 3,24 мкТл и 2,0 м – 2,56 мкТл, при предельно допустимых нормах 10 мкТл. Установлено, что при действии с частотой 100 Гц в течение 30 мин в образце, находящемся под излучателем, наблюдалась гибель исследуемой микрофлоры, на расстоянии 0,5 м от излучателя наблюдается незначительное изменения числа колоний, а от 1,0 до 2,0 м - значительных изменений в числе колоний не наблюдалось (Рис. 8). При анализе электромагнитного излучения в контрольных точках были зафиксированы следующие показатели: на расстоянии 0,5 м – 9,06 мкТл; 1,0 м – 6,21 мкТл; 1,5 м – 4,54 мкТл и 2,0 м – 2,66 мкТл. Установлено, что безопасное расстояние от излучателя 0,5 м.

Изучение влияния ЭМП НЧ на мясное сырье и стартовые культуры

Далее изучали влияние ЭМП НЧ на свойства мясного сырья с частотой 100 Гц и продолжительностью 30 мин. Для этого мышцы из тазобедренной части свинины и говядины помещали под излучатель ЭМП НЧ и обрабатывали с частотой 100 Гц в течение 30 мин. При воздействии ЭМП НЧ, наблюдалось снижение микробиологической обсемененности образцов (Табл. 1).

Таблица 1 – Изменение микробиологической обсемененности мясного сырья после обработки ЭМП НЧ

Наименование образца	Время обработки, мин	Частота f, Гц	КМАФАнМ, КОЕ/г
Говядина (контроль)	–	–	$2{,}1 \cdot 10^5$
Говядина	30	100	$1{,}1 \cdot 10^2$
Свинина (контроль)	–	–	$9{,}4 \cdot 10^4$
Свинина	30	100	$1{,}0 \cdot 10^2$

При действии ЭМП происходит изменение проницаемости мембран миофибрилл, перераспределение влаги в коллоидной системе мышечной ткани говядины и свинины, изменение степени дисперсности белков [14, с. 220, 15, с. 1730, 16, с. 1710], что влияет на изменение pH и влагосвязывающую способность (ВСС) мяса (Табл. 2).

Таблица 2 – Влияние ЭМП НЧ на pH и ВСС мяса

Наименование образца	Время обработки, мин	Частота f,Гц	pH	ВСС, %
Говядина (контроль)	–	–	6,10±0,12	68,00±1,12
Говядина	30	100	5,90±0,07	63,50±1,05*
Свинина (контроль)	–	–	5,5±0,1	56,00±1,58
Свинина	30	100	5,3±0,08	52,30±0,4*

* – $P \leq 0{,}05$

Микроструктурный анализ мышечной ткани, подвергнутой действию ЭМП НЧ, с частотой 100 Гц и продолжительностью 30 мин показывают, что мышечная ткань свинины характеризуется деструктивными изменениями, повреждениями сарколеммы, фрагментацией мышечных волокон (Рис. 9,10). Мышечные волокна достаточно часто разобщаются, за счет появления вокруг них светлого не окрашиваемого гематоксилином и эозином пространства или же тесно сближены между собой [11, с. 44, 12, с. 225].

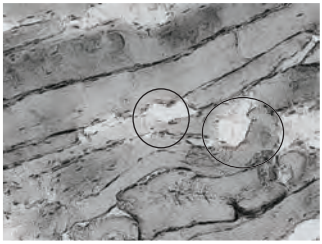


Рисунок 9 – Продольный срез мышечных волокон свинины. Поперечные трещины и фрагментация. Окр. гематоксилин-эозин. Ув. 200×:1 – разрывы эпимизия;
2 – фрагментация мышечных волокон

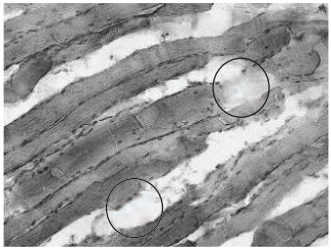


Рисунок 10 – Продольный срез мышечных волокон говядины. Окр. гематоксилин-эозин. Ув. 200×: 1 – разрыхление миофибриллярных пучков; 2 – фрагментация мышечных волокон

При анализе мышечной ткани говядины, после электромагнитной обработки с частотой 100 Гц с продолжительностью 30 мин установлено: компоновка отдельных волокон в первичном пучке довольно рыхлая, с заметным светлым пространством в области эндомизия. Не всегда хорошо различима граница между отдельными мышечными волокнами (Рис. 10). Деструктивные изменения в мышечной ткани, в результате электромагнитного воздействия, выражены достаточно значительно и связаны с возникновением резонанса внешних частот и внутренней частоты мышечной ткани [7, с. 111].

Для интенсификации технологического процесса производства сырокопченых колбас применяются стартовые культуры, действие которых связано с образованием специфических биологически активных компонентов, среди которых органические кислоты, ферменты и др. [17, с. 1150, 18. с. 94, 19, с. 224]. Для определения степени действия на модельную систему вносимых обработанных ЭМП НЧ стартовых культур, был использован модельный фарш, состоящий из 60 % говядины охлажденной и 40 % свинины охлажденной. Мясное сырье предварительно измельчали на волчке с диаметром решетки d=3 мм. В качестве экспериментальной микрофлоры использовали стартовые культуры Альми 2 фирмы Almi. В соответствии с рекомендациями производителя стартовых культур, контрольную группу активировали водой в объеме 100 $см^3$ с температурой 25-30 °С, оставляли на 30 мин, до ее полного растворения и вносили в модельный фарш. Для опытной группы активацию стартовых культур проводили аналогично контрольной, но по завершению растворения обрабатывали ЭМП НЧ с частотой 45 Гц в течение 60 мин.

Из предварительных опытов известно, что ЭМП НЧ способно ускорить развитие микрофлоры. В связи с этим, была определена оптимальная дозировка внесения обработанных ЭМП НЧ стартовых культур (Табл. 3).

Таблица 3 – Динамика роста стартовой микрофлоры

Количество стартовых культур г/100 кг фарша	Продолжительность, ч				
	0	3	6	9	12
	Количество клеток, КОЕ/г				
20 (контроль)	$4,8•10^5$	$5,7•10^5$	$6,7•10^5$	$8,7•10^5$	$1,0•10^6$
17,5	$5,2•10^5$	$6,8•10^5$	$8,1•10^5$	$1,7•10^6$	$2,4•10^6$
15,0	$4,9•10^5$	$6,1•10^5$	$7,4•10^5$	$9,5•10^5$	$1,6•10^6$
12,5	$4,1•10^5$	$4,7•10^5$	$5,8•10^5$	$7,1•10^5$	$8,2•10^5$
10,0	$3,7•10^5$	$4,1•10^5$	$4,7•10^5$	$5,2•10^5$	$6,1•10^5$

Слишком быстрый рост стартовых культур может привести к закислению фарша, а слабый рост – к неэффективной работе микрофлоры [17, с. 1152, 20, с. 102], в связи с этим, опытным путем было определена дозировка: 15 г стартовых культур на 100 кг фарша.

Важными показателями, формирующими качество сырокопченых колбас, являются изменение физико-химических и функционально-технологических показателей мясного сырья [21, с. 99, 22, с. 106]. Установлено, что контрольный образец модельного фарша по ВСС превосходит опытный с добавлением стартовых культур, обработанных ЭМП НЧ. Показатель ВСС опытного образца имеет тенденцию к снижению по сравнению с контрольным (Рис. 11).

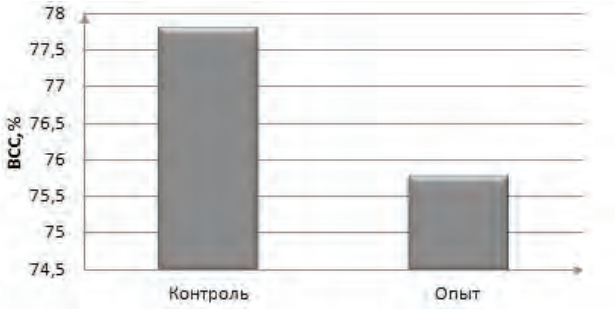


Рисунок 11 – Влагосвязывающая способность модельных фаршей

При формировании монолитной структуры измельченного мяса, большое значение имеет показатель липкости или адгезии. Установлено (Рис. 12), что при внесении обработанных ЭМП НЧ стартовых культур (опыт), липкость модельного фарша увеличивается на 15,3 % по сравнению с контролем.

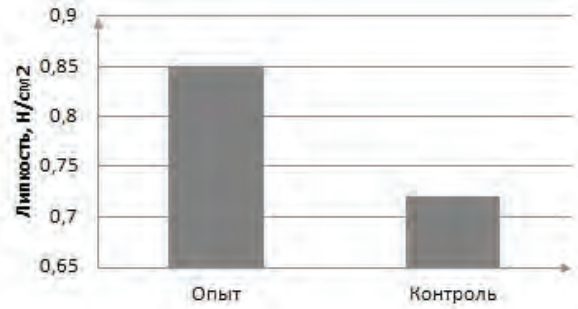


Рисунок 12 – Липкость фарша при внесении стартовых культур

Анализ снижения уровня pH фарша (Рис. 13) свидетельствует о накоплении органических кислот в результате работы стартовой микрофлоры. Накопление молочной кислоты в процессе ферментации фарша, приводит к снижению pH, вследствие чего происходит [19, с. 225]:

– увеличение устойчивости фарша к действию гнилостных микроорганизмов;

–набухание коллагена соединительной ткани;

– повышение активности катепсинов;

– интенсификация реакции цветообразования;

– изменение вкуса и аромата мяса.

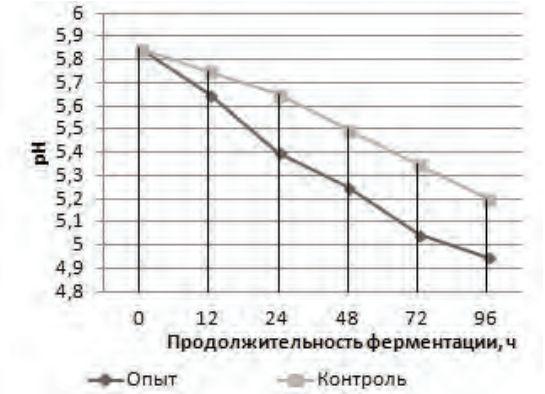


Рисунок 13 – Динамика изменения pH модельного фарша

На рисунке 14 показана динамика роста молочной кислоты в исследуемых образцах. Опытный образец, через 12 ч выдержки модельного фарша, по количеству молочной кислоты, превышал контрольный на 10 %. Через пять дней - разница составила 17,5 %, что свидетельствует о более быстром накоплении молочной кислоты в опытной группе.

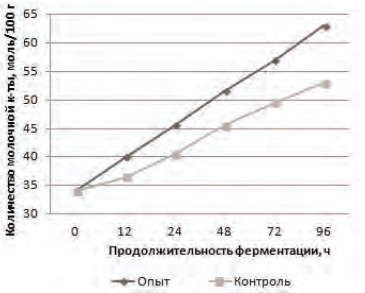


Рисунок 14–Динамика накопления молочной кислоты модельного фарша

Одним из важнейших показателей эффективности стартовых культур, является их протеолитическая активность. Она определяется степенью расщепления белков мяса. Анализ аминокислотного состава показал увеличение аминокислот в опыте на 6,8 %, по сравнению с контролем.

Накопление водорастворимой фракции и свободно связанной влаги способствует эффективной сушке колбасных изделий за счет перехода прочносвязанной влаги в слабосвязанную. Полученные результаты исследований влияния ЭМП НЧ на ВСС, pH и липкость модельных фаршей, также свидетельствуют о более эффективной работе стартовых культур, подвергнутых активации ЭМП НЧ.

Интенсификация технологии сырокопченых колбас

Для проведения апробации технологии производства сырокопченых колбас с применением ЭМП НЧ, была выбрана рецептура колбасы «Тихорецкая» ТУ 9213-006-00422020-2002.

Для сравнительной оценки опытной группы колбас было выработано две партии, отличающиеся в рецептурном составе следующими компонентами: контроль – стартовые культуры Альми-2 – 20 г на 100 кг фарша; опыт – активированные ЭМП НЧ стартовые культуры Альми-2 – 15 г на 100 кг фарша, мясное сырье с предварительной обработкой ЭМП НЧ [23, с. 1116]. В ходе опыта контролировались показатели pH (Рис. 15), массовая доля влаги (Рис. 16) и количество КМАФАнМ КОЕ/г продукта (Табл. 4).

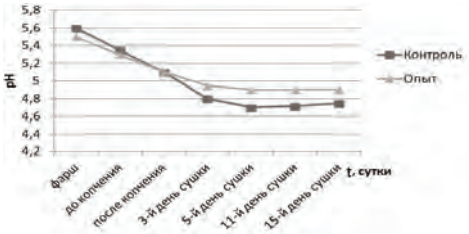


Рисунок 15 – Изменения величины pH в процессе осадки, копчения и сушки сырокопченых колбас

Снижение pH колбас контрольной партии, происходит медленно, с ускорением в начале сушки и обуславливается накоплением молочнокислых микроорганизмов. Снижение pH колбас в опыте, происходит быстро, равномерно, не допуская излишнего подкисления фарша.

Установлено, что в опытном образце потеря влаги (Рис. 16) происходит более интенсивно. Это обусловлено появлением микропор в мясном сырье, после воздействия ЭМП НЧ, что подтверждается микроструктурным анализом готовой продукции.

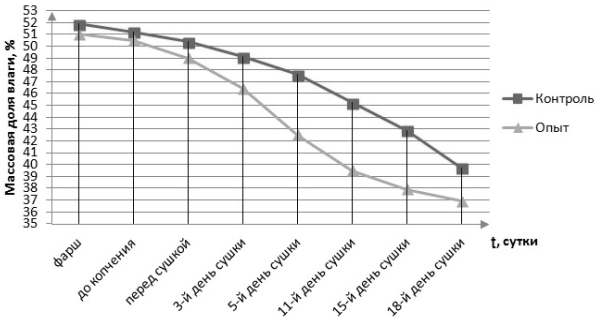


Рисунок 16 – Снижение массовой доли влаги в процессе сушки колбас

Интенсивный рост микрофлоры в образцах сырокопченой колбасы опытной партии, определен предварительной активацией стартовых культур ЭМП НЧ, при этом основная часть микрофлоры – это вносимые стартовые культуры.

Таблица 4 – Количественное изменение микрофлоры сырокопченых колбас

Период исследования	Количество микрофлоры, КМАФАнМ КОЕ/г	
	Контроль	Опыт
Фарш после составления	$3{,}3 \cdot 10^5$	$2{,}1 \cdot 10^6$
Колбаса до копчения	$3{,}5 \cdot 10^5$	$2{,}4 \cdot 10^6$
Колбаса после копчения	$1{,}2 \cdot 10^6$	$9{,}0 \cdot 10^5$
На 3-й день сушки	$8{,}1 \cdot 10^5$	$1{,}0 \cdot 10^5$
На 5-й день сушки	$9{,}3 \cdot 10^4$	$2{,}0 \cdot 10^4$
На 11-й день сушки	$5{,}1 \cdot 10^3$	$4{,}0 \cdot 10^2$
На 15-й день сушки	$8{,}4 \cdot 10^2$	$3{,}0 \cdot 10^2$

При гистологическом исследовании готовых колбас установлено, что в мышечных волокнах наблюдаются поперечные трещины и разрывы, захватывающие, как фибриллярный белковый комплекс, так и сарколемму. Значительная часть мышечных волокон фрагментирована (Рис. 17).

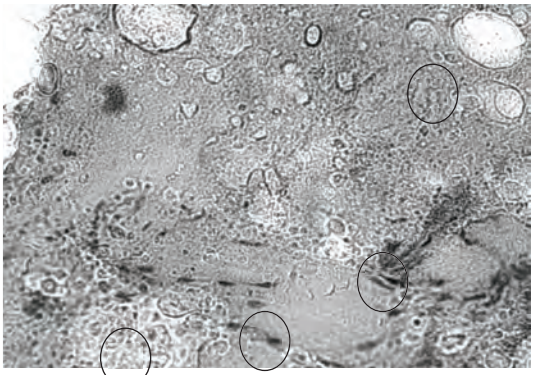


Рисунок 17 – Фрагменты мышечных волокон в сырокопченой колбасе. Окр. гематоксилин-эозин. Ув. 200$^{\times}$: 1 – фрагменты мышечных волокон; 2 – микроорганизмы; 3 – микропоры; 4 – жировые включения

Между мышечными волокнами встречается большое количество микропор. Отдельные микробные клетки бактериальной закваски, располагаются между частицами фарша, покрывают внутреннюю поверхность фаршевых пор и выявляются в большем количестве.

В соответствии с протоколами испытательного центра ЗАО «Мясокомбинат «Тихорецкий» № 47-49, 56, 65, опытная партия сырокопченых колбас соответствует по физико-химическим, микробиологическим, токсикологическим, органолептическим показателям, срокам годности ТУ 9213-006-00422020-2002. Готовый продукт прошел органолептическую оценку специалистов ЗАО «Мясокомбинат «Тихорецкий». Опытный образец отличался более выраженным вкусо-ароматическим букетом (Рис. 18).

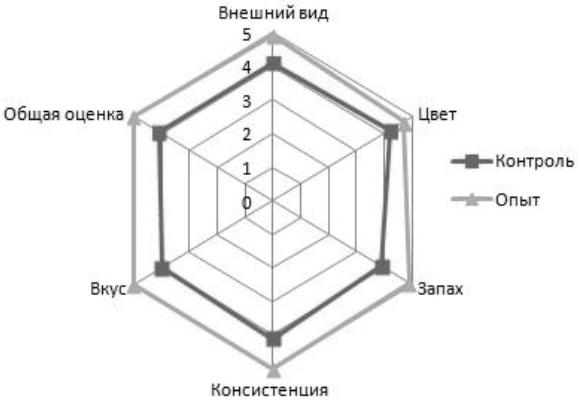


Рисунок 18– Органолептический профиль готовой колбасной продукции по пятибалльной шкале

В ходе дегустации, была выявлена более плотная консистенция опытного образца. Данные дегустации подтверждаются исследованиями структурно-механических характеристик готового продукта. Для этого были проведены исследования напряжения среза готового продукта. Для опытного образца напряжение среза составило 559,59 кПа, для контрольного - 478,56 кПа. Результаты исследований свидетельствуют о более плотной консистенции сырокопченой колбасы опытной партии.

Наряду с такими качественными показателями, как химический состав, микробиологические, физико-химические, биохимические и органолептические показатели, огромное значение имеет биологическая ценность готового продукта, которая определялась на белых лабораторных крысах [24, с. 775, 25, с. 100]. Данный опыт проводился в виварии ГНУ Северо-Кавказского научно-исследовательского института животноводства в течение 28 дней. Для проведения опыта были сформированы две группы по пять голов крыс в каждой, в возрасте 1 месяц. Первая группа животных служила в качестве контроля, а вторая была опытной. Рационы для растущих крыс составлялись в соответствии с нормами потребностей лабораторных крыс в питательных веществах.

Полученные данные ростовых показателей крыс (Рис. 19), свидетельствуют о том, что среднесуточный прирост массы тела за 28 дней у опытной группы составил 3,97 г или 107,5 % в сравнении с контролем.

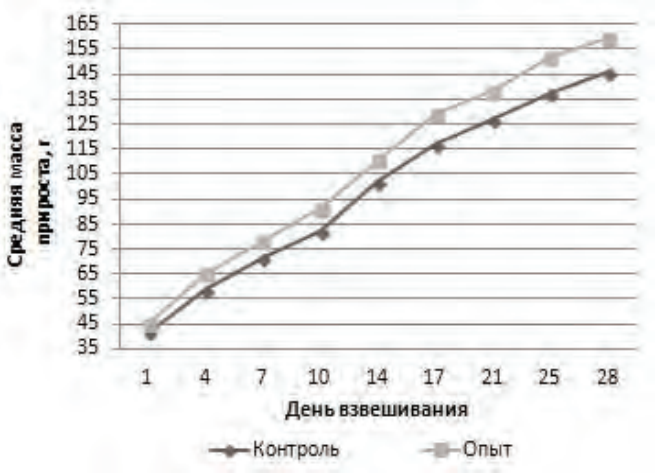


Рисунок 19 – Динамика роста массы тела крыс, участвующих в эксперименте

После проведения массовых измерений опытные и контрольные крысы были умерщвлены путем одномоментного декапитирования.

Определение биохимических показателей крови лабораторных крыс проводили на биохимическом анализаторе Vitalab Flexor Junior (страна производитель Нидерланды). В ходе опыта анализировали следующие показатели: лейкоциты, лейкограмма, эозинофилы, палочкоядерные нейтрофилы, сегментоядерные нейтрофилы, лимфоциты, моноциты, эритроциты, гемоглобин, гематокрит, тромбоциты, тромбокрит, белок, альбумины, глобулины (α, β, γ), холестерин, аспартатаминотрансферазы, аланинаминотрансферазы, кальций, фосфор, триглицериды, щелочная фосфатаза, железо. Повышенный показатель эозинофилов может говорить о проявлении аллергической реакции на компоненты пищи. В контрольной группе средний показатель эозинофилов вышел за пределы нормы (по данным И. В. Ананич, М. А. Дерхо, 2010 г норма до 2 %) и составил 2,2 %. Снижение данного показателя в опытной группе до 1,8 % свидетельствует о снижении аллергической нагрузки на организм животных. Остальные показатели не имели отклонений и находились в пределе допустимой нормы.

Выводы:

1. Изучено влияние ЭМП частот диапазона от 10 до 110 Гц и продолжительностью воздействия от 15 до 60 мин на микрофлору мясного сырья. Установлено, что пик развития микрофлоры наступает при частоте 45 Гц и продолжительности обработки 60 мин, угнетение развития микрофлоры наблюдается при действии ЭМП с частотой 100 Гц и продолжительностью 30 мин.

2. Установлено, что при действии на говядину охлажденную и свинину охлажденную ЭМП НЧ с частотой 100 Гц в течение 30 мин, при микроструктурном исследовании, в мясе наблюдаются частичные разрушения клеточной структуры, что обусловливает уменьшение ВСС мяса (для говядины – с 68,00±1,12 % до 63,00±1,05 %, для свинины – с 56,00±1,58 % до 52,30±0,4 %). Снижается микробиологическая обсемененность говядины – с $2{,}1 \cdot 10^5$ до $1{,}1 \cdot 10^2$ КОЕ/г, свинины – с $9{,}4 \cdot 10^4$ до $1{,}0 \cdot 10^2$ КОЕ/г ($P \leq 0{,}05$), незначительно смещается показатель pH мяса в кислую сторону: для говядины – с 6,10±0,1 до 5,90±0,73, для свинины – с 5,50±0,1 до 5,30±0,85 ($P \geq 0{,}05$).

3. Установлено, что обработка стартовых культур препарата Альми-2 частотой 45 Гц в течение 60 мин стимулирует их рост: при внесении обработанных ЭМП НЧ стартовых культур в модельный фарш существенно снижается pH фарша – с 5,85 до 4,95, увеличивается количество аминокислот на 6,8 %, снижается ВСС – с 81,78 % до 77,80 %, ВУС – на 4,8 %, увеличивается липкость фарша – на 15,3 %.

4. Изучено влияние обработки ЭМП НЧ мясного сырья и стартовых культур на скорость сушки сырокопченых колбас. Установлено, что при применении ЭМП НЧ продолжительность технологического процесса

производства сырокопченых колбас сокращается на 7 суток и составляет 14 суток.

5. Внесены изменения в технологическую инструкцию по производству сырокопченых колбас, проведена промышленная апробация усовершенствованной технологии на ЗАО «Мясокомбинат «Тихорецкий» г. Тихорецк Краснодарского края. На основании оценки качества продукта испытательным центром ЗАО «Мясокомбинат «Тихорецкий», опытная партия сырокопченых колбас соответствует по физико-химическим, микробиологическим, токсикологическим, органолептическим показателям и срокам годности ТУ 9213-006-00422020-2002.

Список использованной литературы:

1. Нестеренко, А. А. Применение стартовых культур в технологии производства ветчины / А. А. Нестеренко, Ю. А. Зайцева // Вестник Казанского государственного аграрного университета. – 2014. – № 1(31) – С. 65-68.

2. Акопян К. В. Способы интенсификации созревания сырокопченых колбас [Текст] / К. В. Акопян, А. А. Нестеренко // Молодой ученый. – 2014. – №7. – С. 95-98.

3. Кенийз Н. В. Интенсификация технологии сырокопченых колбас / Н. В. Кенийз, А. А. Нестеренко, Д. К. Нагарокова // Политематический сетевой электронный научный журнал Кубанского государственного аграрного университета (Научный журнал КубГАУ) [Электронный ресурс]. – Краснодар: КубГАУ, 2014. – №09(103). С. 1016 – 1039. – IDA [article ID]: 1031409066. – Режим доступа: http://ej.kubagro.ru/2014/09/pdf/66.pdf, 1,5 у.п.л.

4. Применение стартовых культур в мясоперерабатывающей промышленности [Текст] / Ю. А. Полтавская [и др.] // Молодой ученый. – 2014. – №8. – С. 229-232.

5. Зарубежный опыт применения стартовых культур при производстве колбас [Текст] / Ю. А. Полтавская [и др.] // Молодой ученый. – 2014. – №10. – С. 192-194.

6. Нестеренко А. А. Использование комплексных смесей для производства колбас / А. А. Нестеренко, Н. В. Кенийз, Д. С. Шхалахов // Политематический сетевой электронный научный журнал Кубанского государственного аграрного университета (Научный журнал КубГАУ) [Электронный ресурс]. – Краснодар: КубГАУ, 2014. – №08(102). С. 1127 – 1148. – IDA [article ID]: 1021408072. – Режим доступа: http://ej.kubagro.ru/2014/08/pdf/72.pdf, 1,375 у.п.л.

7. Нестеренко А.А. Разработка технологии производства сырокопченых колбас с применением электромагнитной обработки мясного сырья и

стартовых культур: дис. ... канд. техн. наук: 05.18.04/ Нестеренко Антон Алексеевич. – Воронеж, 2013. – 185 с.

8. Нестеренко А. А. Применение стартовых культур в технологии сырокопченых колбас [Текст] / А. А. Нестеренко, К. В. Акопян // Молодой ученый. – 2014. – №8. – С. 216-219.

9. Нестеренко, А. А. Инновационные технологии в производстве колбасной продукции / А. А. Нестеренко, А. М. Патиева, Н. М. Ильина. – Саарбрюккен: Palmarium Academic Pudlishing, 2014. – 165 с.

10. Нестеренко, А. А. Влияние активированных электромагнитным полем низких частот стартовых культур на мясное сырье / Нестеренко А. А., Горина Е. Г. // Политематический сетевой электронный научный журнал Кубанского государственного аграрного университета (Научный журнал КубГАУ) [Электронный ресурс]. – Краснодар: КубГАУ, 2014. – №05(099).– С. 786-802. – IDA [article ID]: 0991405053. – Режим доступа: http://ej.kubagro.ru/2014/05/pdf/53.pdf, 1,063 у.п.л.

11. Нестеренко, А. А. Электромагнитная обработка мясного сырья в технологии производства сырокопченой колбасы // Наука Кубани. 2013. № 1. С. 41-44.

12. Нестеренко А. А. Изучение действия электромагнитного поля низких частот на мясное сырье [Текст] / А. А. Нестеренко, К. В. Акопян // Молодой ученый. — 2014. — №4. — С. 224-227.

13. Nesterenko A. A. The impact of starter cultures on functional and technological properties of model minced meat / A. A. Nesterenko // Austrian Journal of Technical and Natural Sciences. – 2014. – № 4 (7-8). – pp. 77-80

14. Нестеренко А. А. Физико-химические показатели сырья после внесения стартовых культур [Текст] / А. А. Нестеренко, К. В. Акопян // Молодой ученый. – 2014. – №8. – С. 219-221.

15. Нестеренко А. А. Биомодификация мясного сырья с целью получения функциональных продуктов / А. А. Нестеренко, К. В. Акопян // Политематический сетевой электронный научный журнал Кубанского государственного аграрного университета (Научный журнал КубГАУ) [Электронный ресурс]. – Краснодар: КубГАУ, 2014. – №07 (101). С. 1721 – 1740. – IDA [article ID]: 1011407112. – Режим доступа: http://ej.kubagro.ru/2014/07/pdf/112.pdf, 1,25 у.п.л.

16. Нестеренко А. А. Выбор и исследование свойств консорциума микроорганизмов для обработки мясного сырья / А. А. Нестеренко, К. В. Акопян // Политематический сетевой электронный научный журнал Кубанского государственного аграрного университета (Научный журнал КубГАУ) [Электронный ресурс]. – Краснодар: КубГАУ, 2014. – №07 (101). С. 1702 – 1720. – IDA [article ID]: 1011407111. – Режим доступа: http://ej.kubagro.ru/2014/07/pdf/111.pdf, 1,188 у.п.л.

17. Нестеренко А. А. Производство ферментированных колбас с мажущейся консистенцией / А. А. Нестеренко, Н. В. Кенийз, Д. С. Шхалахов // Политематический сетевой электронный научный журнал Кубанского государственного аграрного университета (Научный журнал КубГАУ) [Электронный ресурс]. – Краснодар: КубГАУ, 2014. – №08(102). С. 1149 – 1160. – IDA [article ID]: 1021408073. – Режим доступа: http://ej.kubagro.ru/2014/08/pdf/73.pdf, 0,75 у.п.л.

18. Акопян К. В. Формирование аромата и вкуса сырокопченых колбас [Текст] / К. В. Акопян, А. А. Нестеренко // Молодой ученый. – 2014. – №7. – С. 93-95.

19. Нестеренко А. А. Функционально-технологические показатели сырья после внесения стартовых культур [Текст] / А. А. Нестеренко, К. В. Акопян // Молодой ученый. – 2014. – №8. – С. 223-226.

20. Аксенова К. Н. Создание и исследование свойств консорциума микроорганизмов для обработки мясного сырья [Текст] / К. Н. Аксенова, Т. П. Мануйлова, А. М. Патиева // Молодой ученый. — 2014. — №7. — С. 100-103.

21. Аксенова К. Н. Влияние углеводов на технологический процесс производства и качественные показатели сырокопченых колбас [Текст] / К. Н. Аксенова, Т. П. Мануйлова, А. М. Патиева // Молодой ученый. — 2014. — №7. — С. 98-100.

22. Актуальные биотехнологические решения в мясной промышленности [Текст] / А. А. Соловьева [и др.] // Молодой ученый. – 2013. – №5. – С. 105-107.

23. Кенийз Н. В. Оптимизация рецептур колбасных изделий в условиях реального времени / Н. В. Кенийз, А. А. Нестеренко, Д. С. Шхалахов // Политематический сетевой электронный научный журнал Кубанского государственного аграрного университета (Научный журнал КубГАУ) [Электронный ресурс]. – Краснодар: КубГАУ, 2014. – №08(102). С. 1113 – 1126. – IDA [article ID]: 1021408071. – Режим доступа: http://ej.kubagro.ru/2014/08/pdf/71.pdf, 0,875 у.п.л.

24. Нестеренко, А. А. Биологическая ценность и безопасность сырокопченых колбас с предварительной обработкой электромагнитным полем низких частот стартовых культур и мясного сырья / Нестеренко А. А., Акопян К. В. // Политематический сетевой электронный научный журнал Кубанского государственного аграрного университета (Научный журнал КубГАУ) [Электронный ресурс]. – Краснодар: КубГАУ, 2014. – №05(099). – С. 772 – 785. – IDA [article ID]: 0991405052. – Режим доступа:http://ej.kubagro.ru/2014/05/pdf/52.pdf, 0,875 у.п.л.

25. Кенийз Н. В. Технология замороженных полуфабрикатов с применением криопротекторов / Н. В. Кенийз, Н. В. Сокол. – Саарбрюккен: Palmarium Academic Pudlishing, 2014. – 129 с.

© А.А. Нестеренко, 2014

УДК 62

Е.Г. Осинцев
к.т.н., доцент кафедры Теоретические основы электротехники
Южно-Уральский государственный университет
г.Челябинск, Российская Федерация
Дарья Владимировна Осинцева
преподаватель кафедры Теоретические основы электротехники
Южно-Уральский государственный университет
г.Челябинск, Российская Федерация
Владимир Владимирович Бабкин
соискатель кафедры Теоретические основы электротехники
Южно-Уральский государственный университет
г.Челябинск, Российская Федерация

СЕПАРАЦИЯ СЕМЯН ПРИ СОВМЕСТНОМ ИСПОЛЬЗОВАНИИ ИНФОРМАЦИОННЫХ И ЭЛЕКТРОТЕХНОЛОГИЙ

Актуальность темы: Увеличение производства зерна было и остается одной из главных задач сельского хозяйства России. Для получения высоких урожаев необходимо высевать качественные семена зерновых культур, использовать современные технологии и высокопроизводительную надежную технику. Проблему повышения урожайности можно достичь двумя способами: во-первых – созданием высокоурожайных сортов; во-вторых - производством и внедрением зерноочистительных машин, позволяющих отбирать самые качественные семена.

Основной причиной снижения всхожести и сохранности семян являются их микротравмы, нарушающие целостность поверхностных оболочек семян. Это позволяет воздуху, влаге и микроорганизмам свободно проникать во внутренние клетки семени.

Известно, что в убранном зерновом материале в среднем содержится 0,92% зерна с выбитым зародышем, 1,64% - с повреждённым зародышем, 8,44% - с поврежденной оболочкой зародыша и эндосперма, 1,1% - с поврежденным эндоспермом, 29,9% - с поврежденной оболочкой эндосперма, 10,1% - дробленого зерна, которое не может использоваться для посева [1, стр.36].

Существующие способы сепарации зерна не позволяют проводить разделение микротравмированных и целых зерен. Поэтому возникла необходимость создания технологии и техники по отделению микротравмированных семян зерновых культур от целых. Это определило направление теоретических и экспериментальных исследований и послужило выбором темы диплома.

Цель: Исследовать процесс отделения микротравмированных семян зерновых культур от целых с использованием электротехнологий. Разработать устройство, позволяющее отделять микротравмированные семена от целых.

Семена сельскохозяйственных культур – это основной элемент технологии возделывания, от которого зависит урожай и качество продукции. Семена высокого качества можно получить при благоприятных почвенно-климатических зональных условиях, современном уровне технологии возделывания и подготовки семян, высоком качестве сортировально-сушильной и уборочной техники.

Самыми важными показателями посевных качеств семян являются всхожесть и энергия прорастания. Всхожесть семян определяет норму высева и пригодность для посева. Для получения дружных и полноценных всходов необходимы семена с высокой всхожестью и энергией прорастания.

Семена зерновых культур, предназначенные к посеву, подлежат обязательной проверке по следующим показателям: цвет, блеск, запах семян (органолептические показатели); крупные примеси; чистота семян; энергия прорастания; всхожесть; жизнеспособность; влажность; пораженность грибными и бактериальными заболеваниями; зараженность амбарными вредителями; подлинность семян, определяемая лабораторным способом (сортовой лабораторный контроль) [2, стр.40].

Чистота – один из важных показателей качества семенного материала, который должен быть чистым, свободным от примесей. Хороший посевной материал должен иметь не менее 99% семян основной культуры и не более 1% отходов; такая партия семян относится по чистоте к I классу. Под чистотой семян понимают весовое количество чистых семян основной культуры, выраженное в процентах к навеске, взятой для анализа.

Семена, не удовлетворившие по всхожести требования стандарта, запрещено использовать на посев. При высеве семян с низкой всхожестью снижается урожайность; такие семена целесообразнее использовать на продовольственные и технические цели.

Тщательно очищенные и отсортированные семена дают дружные всходы. При очистке посевного материала от сорняков исключается их внесение в почву, что создает хорошие условия получения высокой урожайности при наименьших затратах на обработку посевов.

Одной из причин снижения всхожести и сохранности семян являются микротравмы. При их наличии нарушается целостность поверхностных оболочек семян, это позволяет воздуху, влаге и микроорганизмам свободно проникать во внутренние клетки. Во время реакции взаимодействия внутренних клеток с воздухом, влагой и микроорганизмами, происходит усиление дыхания и ослабление организма. Процесс дыхания опасен тем, что он сопровождается выделением теплоты и окислением внутренних клеток семян [2, стр.23].

Хранение поврежденных семян сопровождается интенсивным дыханием и нагревом, что приводит к активному развитию бактерий, плесени и вредителей, которые поражают проростки. Ростки поврежденных семян зачастую не достигают поверхности почвы, так как они плохо используют запасы питательных веществ зерновки, это приводит к тому, что они теряют геотропическую ориентацию и начинают изгибаться в различных направлениях. Микротравмы семян приводят к перерасходу семенного материала из-за снижения всхожести и энергии роста, что приводит к увеличению нормы высева и снижению урожайности [3, стр.44].

Зерновой материал в среднем содержит от 20 до 60% разного рода повреждений и только около 40% пригодного для семенных целей [1, стр.34].

С.А. Чазов установил [4, стр.75], что по сравнению с целыми, повреждённые семена снижают урожай на 1,4…6,9 ц/га, а также повреждения семян снижают урожай яровой пшеницы на 6…14%, ячменя на 18%, озимой ржи на 25%.

В таблице 1 приведены данные зависимости посевных показателей качества пшеницы Безостая 1 от количества и вида повреждений [5, стр.65].

Таблица 1 – Посевные показатели от количества и вида повреждений пшеницы

Количество микротравмированных зерен, %	Трещины зерен, %				Срывы оболочек, %				Повреждения зародыша (оголен, поврежден, выбит), %	Повреждения эндосперма (расколот, оторвана часть), %	Фактическая всхожесть, %	
	На спинке в области		на зародыше	со стороны бороздки	На спинке в области		на зародыше	со стороны бороздки			по ГОСТ 12038-66	В почве
	бороздки	зародыша			бороздки	зародыша						
6	0	1	2	0	0	0	2	0	1,0	0	98	92
20	1	0,5	1	0,5	0,5	0,5	6,5	0,5	6,5	2,5	95	85
40	2	1	8,5	1,5	1	1	10	1	12	2	94	75
60	2,5	3	12,5	2	2	2	17	2,5	14,5	2	92	63
80	3	4	15	3	3	4	23,5	3	19	2,5	87	53

100	4	5	19	5,5	3,5	5	26	5,5	23	3,5	85	44

На примере пшеницы Безостая 1 (таблица 1) показано снижение всхожести семян от количества микротравмированных зерен.

Доказано, что повреждение зародыша приводит к снижению урожая зерна колосовых культур на 7,1 ц/га, а сильно поврежденные семена - на 13,9…15,3 ц/га по сравнению с урожаем неповрежденных семян. В среднем по зерновым культурам 1% поврежденных семян в посевном материале вызывает недобор урожая, равный 5 кг, иными словами, 30% поврежденных семян снижают урожай зерна с каждого гектара на 1,5 центнера [6, стр.72].

Таблица 2 – Влияние механических повреждений на посевные качества семян зерновых культур [7, стр.54]

Вид повреждения	ГОСТ 12038-66			Метод выращивания в рулонах			Сила начального роста (всхожесть на седьмые сутки)	
	Энергия прорастания, %	Средняя всхожесть, %	Всхожесть, % к контролю	Энергия прорастания, %	Всхожесть,%	Всхожесть, % к контролю	%	% к контролю
Целые семена (контроль)	96	97	100	98	98	100	84	100
Внутренние трещины	93	96	99	-	-	-	82	98
Треснута оболочка на спинке в области бороздки	92	95	98	-	-	-	73	87
Треснута оболочка со стороны	91	-	-	-	-	-	-	-

бороздки								
Треснута оболочка на спинке в области зародыша	88	93	96	-	-	-	48	57
Треснута оболочка на зародыше	87	-	-	93	94	96	-	-
Сорвана оболочка на спинке в области бороздки	87	89	92	-	-	-	70	88
Сорвана оболочка со стороны бороздки	86	-	-	-	-	-	-	-
Сорвана оболочка на спинке в области зародыша	86	88	91	-	-	-	42	50
Сорвана оболочка на зародыше	79	-	-	69	79	81	-	-
Зародыш оголен	77	82	84	55	70	72	36	43
Эндосперм расколот или оторвана часть его	42	44	53	-	-	-	12	15

По данным В.Б. Лебедева составлена таблица 2, в которой отражено влияние механических повреждений семян на посевные качества.

Опираясь на выше изложенный материал, можно сказать, что микротравмы зерна существенным образом влияют на посевные показатели семян. Удаление микротравмированных зерен из семенного материала уменьшит потери семян.

Общепризнано, что все механические микротравмы зерна можно разделить на две большие группы: макро- и микроповреждения [2, стр.37].

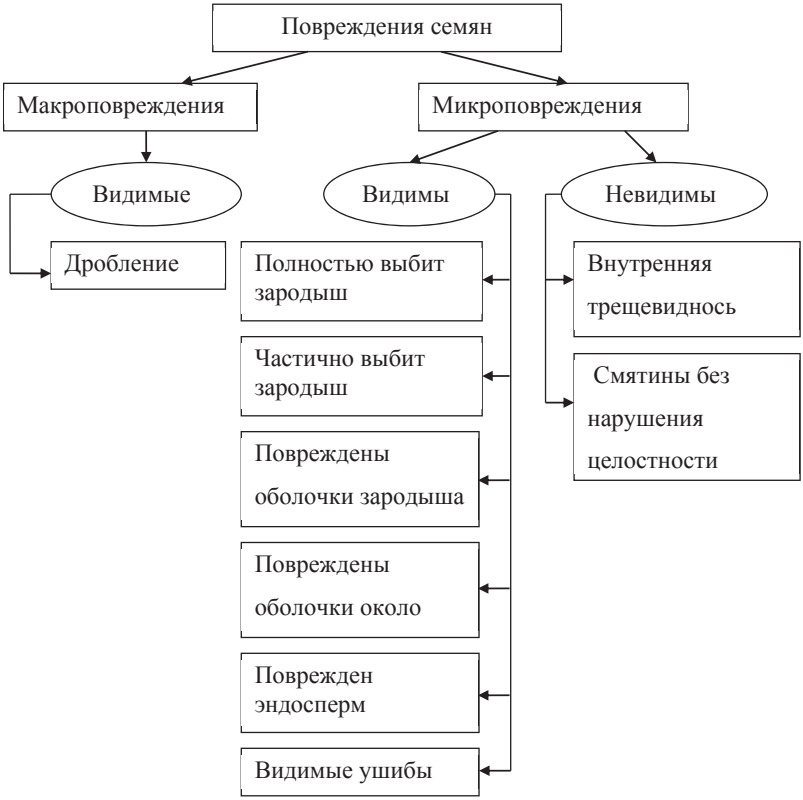


Рисунок 1 – Классификация микротравм семян зерновых культур.

Механические воздействия приводят к повреждениям оболочек зерна, а также зародыша и эндосперма. Проходя через зерноочистительные и сортировальные машины, зерно повреждается на шнеках, решетах, транспортерах и в триерах. Выборочное обследование поточных линий показывает, что количество механических повреждений зерна машинами и оборудованием колеблется в значительных пределах. Зерноочистительные и сортировальные машины повреждают зерно от 3,4 до 8,4%, нории – от 4,6 до 10,2%, пневматические транспортеры – до 17,2%, самоточные трубопроводы – до 1,6% [8, стр.24].

Основные повреждения зерно получает во время обмолота комбайном. Комбайновому способу уборки присущи потери зерна и его травмирование: макроповреждения (дробление) могут составить от 3% до 20%, а микроповреждение – от 40% до 60% [9, стр.45]:

В [10, стр.78] приводятся данные потерь зерна при уборке. Без учета биологических потерь дробление зерна колосовых культур в 2…4,5 раза больше допустимого.

Повреждение зерна возникает также при сушке. Во время сушки, кроме механических повреждений, возникающих от прикосновения к рабочими органами сушилки, семена подвергается растрескиванию из-за влияния градиента температуры. Снижение влажности семян повышает его стойкость к механическим воздействиям, поэтому после сушки семена меньше подвергается повреждениям другими машинами.

Микротравмирование семян в существующем процессе производства является неизбежным. Отделение микротравмированных зерен от целых в семенном материале способствует снижению нормы высева, увеличению урожайности, сохранению фуражной части и сохранности.

Таким образом, необходим способ и устройство, позволяющие отделить целые семена от микротравмированных. Для того чтобы разработать способ разделения целых и микротравмированных семян зерновых культур и реализовать его в готовое техническое устройство, необходимо исследовать существующие способы и технические решения.

Электрические сепараторы можно классифицировать: по виду электрического поля - на сепараторы электростатические, коронные, с переменным полем и комбинированные; по конструкции - на камерные, барабанные, транспортерные (ленточные), решетные и другие.

В электросепараторах частицы материалов разделяются по совокупности физических, в том числе и электрических свойств, таких как: электропроводность. диэлектрическая проницаемость, поляризуемость, способность воспринимать и отдавать заряд.

Электрозерноочистительные машины имеют возможность разделять семена по электрическим свойствам. Используя эти свойства можно разделять трудноразделимые зерновые смеси. Большие затруднения при отделении вызывают микротравмированные семена зерновых культур.

В исходном состоянии микротравмированные и целые семена зерновых культур имеют практически одинаковые электрические свойства. Мы ставим задачу сделать электрические свойства различными.

Нами впервые был разработан способ разделения целых и микротравмированных семян, впервые разработано устройство, которое способно разделять частицы одинаковые по диэлектрическим свойствам и размерам, но различные по проводимости [11, стр.2].

Для решения этой цели сепаратор имеет ряд конструктивных отличий. Осадительный электрод выполнен в виде транспортерной ленты из электропроводящего материала, натянутой на два заземленных металлических цилиндра. Коронирующий электрод может изменять свою длину и расположен только над горизонтальной поверхностью транспортера, тем самым, создаются две явно выраженные зоны: зона зарядки и зона разрядки, расположенные перед зоной разделения. Это позволяет разделять смесь по остаточному заряду частиц и регулировать время зарядки и разрядки, что в свою очередь определяет заряд частиц.

Коронный электросепаратор (рисунок 2) состоит из электродвигателя 6, загрузочного бункера 5, источника высокого напряжения 7, коронирующего электрода 1, который ограничен зоной зарядки, осадительного электрода 2, выполненного в виде ленточного транспортера из проводящего материала и вращающегося на двух

заземленных металлических цилиндрах, классификатора 4, щеточки для удаления налипших частиц 3.

Сепаратор работает следующим образом [12, стр.2]: при подаче напряжения на коронирующий электрод 1 возникает поле коронного разряда. Частицы из бункера 5 поступает в зону зарядки между коронирующим 1 и осадительным 2 электродами, в результате чего приобретают электрический заряд. После выхода из зоны зарядки частицы попадают в зону разрядки, где они разряжаются. Электрический заряд, полученный частицей в поле коронного разряда, стекает на электропроводящую ленту.

Скорость разрядки зависит от суммарного сопротивления «частица-электрод», определяется проводимостью частицы и электропроводностью воздуха. Частицы с большей проводимостью разряжаются быстрее, чем с меньшей проводимостью.

При выходе из зоны разрядки частицы попадают в зону разделения, где на них действуют сумма сил, которая и определяет угол отрыва частицы от электрода. В этой зоне на частицу действуют три силы: сила взаимодействия заряженной частицы с плоскостью ленты, сила тяжести и центростремительная сила. Сила взаимодействия прижимает частицу к ленте, она зависит от величины заряда частицы, центробежная сила отталкивает её, а сила тяжести в верхнем полуцилиндре прижимает её к ленте, в нижнем – отрывает от него.

В зависимости от суммарного действия сил распределение частиц образует веер. Частицы с большей проводимостью успевают разрядиться до зоны разделения и отбрасываются силами инерции с поверхности ленты. Частицы с меньшей проводимостью несут на себе заряд, тем самым прижимаются к ней электрическими силами. В зависимости от остаточного заряда частицы распределяются в классификаторе.

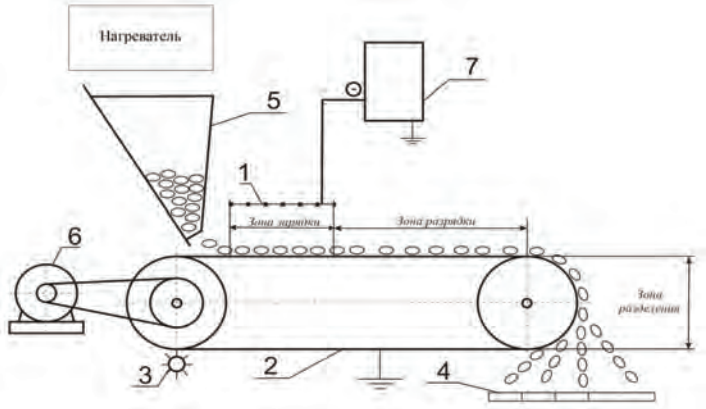


Рисунок 2 – Электрозерновая машина транспортёрного типа

Изучая электрические параметра семян зерновых культур, нами было обнаружено, что их проводимость зависит от влажности. Для того чтобы наше

устройство имело возможность разделять семена различных сортов и различной влажности, коронирующий электрод должен быть выполнен подвижным и изменяемым, для возможности изменения зон зарядки и разрядки.

Данное устройство имеет два патента на полезную модель №68366 «Коронный электросепаратор семян» и №71566 «Коронный электросепаратор» патент на изобретение №2351399 «Коронный электросепаратор», авторы Знаев А.С., Осинцев Е.Г.

Таким образом гипотеза послужила основой для разработки способа разделения целых и микротравмированных семян зерновых культур, была воплощена в устройстве «Коронный электросепаратор», которое прошло экспертизу в Федеральной службе по интеллектуальной собственности, патентам и товарным знакам.

При попадании семян в нагреватель внутренние части зерна нагреваются равномерно по всему объему, в результате чего происходит подсушка поверхности зерна и выделение влаги из внутренних частей наружу. Зерна, имеющие целые покрывные оболочки, испаряют со своей поверхности меньшее количество влаги, чем микротравмированные. Этим достигается эффект различия между проводимостью целых и микротравмированных семян. Затем семена поступают в бункер-питатель. При подаче напряжения на коронирующий электрод 1 возникает поле коронного разряда. Зерно из бункера 5 поступает в зону зарядки между коронирующим 1 и осадительным 2 электродами, в результате чего приобретают электрический заряд. Электрический заряд, полученный частицей, зависит от электрических свойств семян. Семена с меньшей проводимостью дольше сохраняют свой заряд, чем семена с большей проводимостью. На выходе из зоны зарядки заряженные семена попадают в зону разделения, где происходит их разделение в зависимость от суммы сил. Если семена имеют одинаковые параметры по массе и геометрическим размерам, но различные по электрическим свойствам, то суммарная сила будет у них разной. Таким образом, более сухие семена будут дольше удерживаться на цилиндре сепаратора, а влажные будут отбрасываться сразу, создавая веер разделения. Классификатор будет принимать семена в ячейках в зависимости от их электрических параметров.

Использование программы Matlab позволяет производить обработку цветных изображений и видеопотоков с использованием встроенных функций и программно-ориентированного моделирования в среде Simulink.

Для исследований фотографий семян пшеницы использовался следующий алгоритм обработки изображений:

```
L01=imread('…');
R01=L01(:,:,1);
G01=L01(:,:,2);
B01=L01(:,:,3);
hR01=imhist(R01);
```

```
hG01=imhist(G01);
hB01=imhist(B01);
Imtool(R01);
Imtool(G01);
Imtool(B01);
```

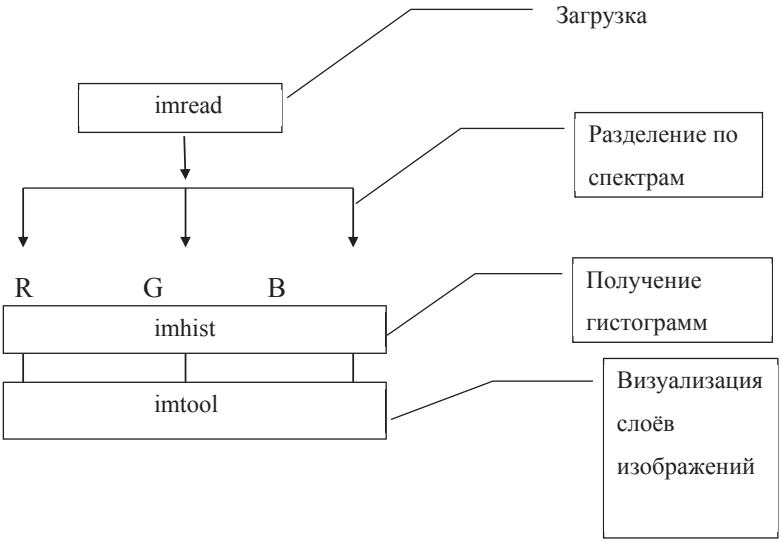


Рисунок 3 – Алгоритм обработки изображений

Встроенная функция imread присваивает переменной L01 матрицу со значениями интенсивности оттенков красного, зелёного, синего (RGB).

Далее разделяем трёхмерную матрицу L01(l,k,3), состоящую из трёх слоёв (RGB) на три двумерных матрицы R01(l,k), G01(l,k), B01(l,k), данная операция позволяет получить гистограмму распределения интенсивности оттенков трёх слоёв R,G,B.

Функция imtool позволяет получить визуальное изображение матрицы R01,G01,B01 и гистограмму, с возможностью обработки.

Функция BW = im2bw (I,level) превращает полноцветное или палитровое изображение в бинарное путем превращения его в начале в полутоновое изображение, а затем применения операции отсечения по порогу яркости. Пикселы преобразованного изображения имеют значение 0 (черный цвет), если уровень порог level не превышен, и 1 (белый цвет) в ином случае. Порог задается в пределах [0,1.0]. эти операции называют бинаризацией изображения.

BW =im2bw (X,map,level) – осуществляет тоже, но для изображения, заданного как исходным массивам X, так и палитрой map. Функция BW= im2bw (RGB,level) превращает в черно-белое изображение RGB –

изображение. Входные аргументы могут быть класса uint8, uint16 или double, выходной параметр BW – класса uint8.

В приведенном ниже примере загружается и строится изображение фрагмента интегральной микросхемы, после чего оно преобразуется в бинарное изображение.

Не трудно заметить, что преобразование в бинарное изображение позволяет резко выделить отдельные фрагменты исходного изображения. Однако, в большинстве случаев такое выделение оказывается слишком грубым. Исключением является выделение изображений с текстовыми надписями.

Функция total = bwarea(BW) выполняет оценку площади объектов бинарного изображения BW. Параметр total является числом, значение которого приблизительно зависит от общего числа пикселов в изображении.

Функция **BWd=bwperim(BWs, n)** создает бинарное изображение BWd, у которого значения различных пикселей объектов исходного изображения установлены в 1, а значения остальных пикселей результирующего изображения установлены в 0. Пиксель считается граничным, если он равен 1 и хотя бы один из его n соседей равен 0. Параметр n для всех рассматриваемых функций bwperim задает критерий связности для пикселей границы и может принимать значения 4 или 8. Если при вызове функции **bwperim** параметр n опущен, то проверяются на равенство нулю все 8 соседей пикселя.

Теоретические исследования позволили разработать новую технологию разделения целых и микротравмированных семян зерновых культур, требования к процессу разделения, реализующего эту технологию.

Для определения конструктивных параметров установки программой исследований предусматривалось:

– Проведение математической обработки цифровых изображений семян зерновых культур

– Исследование цифровых изображений целых и микротравмированных семян зерновых культур при обычной освещённости с помощью программы Matlab

– Исследование цифровых изображений целых и микротравмированных семян зерновых культур при ультрафиолетовом освещении с помощью программы Matlab

– Исследование процесса разделения целых и микротравмированных семян зерновых культур на экспериментальной установке (рис.4)

В данной экспериментальной установке мы используем:

– транспортерная лента

– веб-камера (2 шт.)

– ультрафиолетовая лампа

– зерно пшеницы.

– Обычное освещение

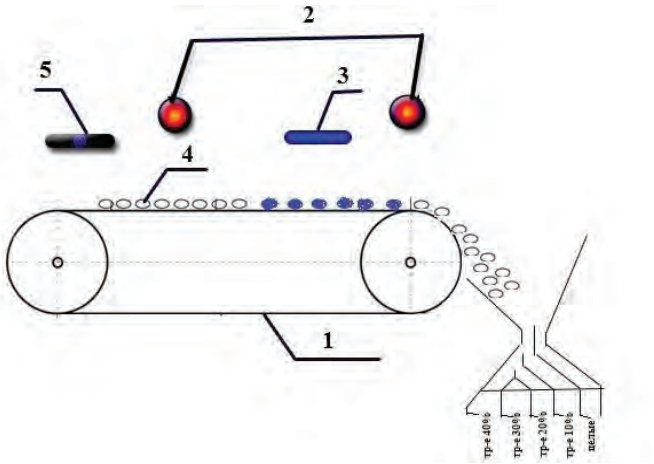
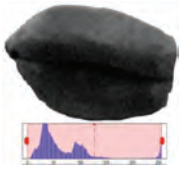
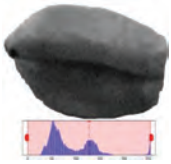
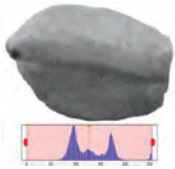
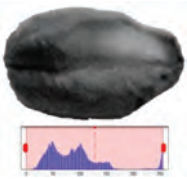
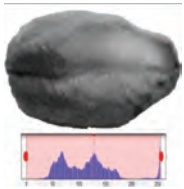
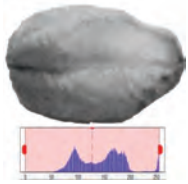


Рисунок 4 – Общий вид экспериментальной установки

В таблице 3 представлены обработки изображений целых и травмированных семян по выше изложенному алгоритму.

В таблице наглядно видно, что целые и травмированные семена пшеницы имеют различные гистограммы распределения оттенков RGB. Гистограмма различается по ширине и смещению спектров.

Таблица 3 – Изображение целых и травмированных семян по слоям RGB с гистограммами

Исходное изображение	Слой красного цвета - R	Слой зеленого цвета - G	Слой синего цвета - B
Целые семена пшеницы			
			
Травмированные семена пшеницы			
			

Чтобы получить численные значения математических ожиданий спектральных характеристик по слоям RGB использовалась встройная функция imtool. В результате обработки гистограмм получена таблица 4.

Таблица 4 - Опытные данные полученные
после обработки изображений

Величина		Целые	Поврежденные
Математическое ожидание	R	170,5	144,7
	G	120	111,4
	B	96	79,0
Среднеквадратическое отклонение	R	14,8	33,6
	G	28	20,6
	B	52,3	24,0

Из таблицы 4 видно, что есть смещение математического ожидания у целых и травмированных семян пшеницы по слоям RGB, кроме того изменяется и дисперсия гистограмм. Данные результаты доказывают возможность разделения семян пшеницы по цветовым характеристикам изображений

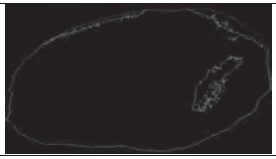
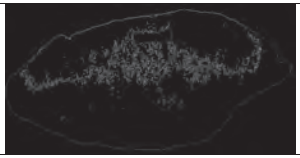
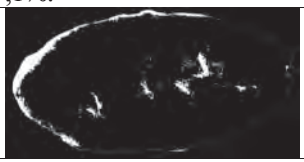
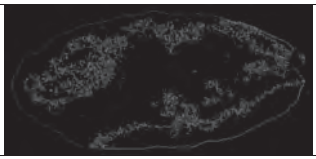
Обработка изображений по цветовым характеристикам RGB даёт неудовлетворительное качество разделения целых и микротравмированных семян. Анализ по цветовым характеристикам может служить только предварительной оценкой. Для более качественного и надёжного разделения предложено использовать УФ свет.

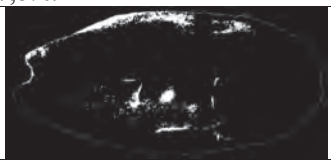
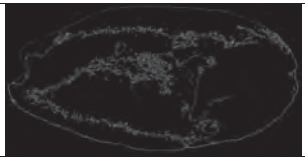
Как известно УФ свет позволяет обнаружить бактерии, которые не видны при обычном освещении. Нами использовалась УФ лампа длина волны излучения которое 400-480 нм. Такой спектр излучения позволяет более чётко увидеть места повреждений оболочек семян, места поражения бактериями.

Обработка изображений семян в УФ свете осуществлялась с использованием встроенных математических функций:

Применение функции **bwperim** позволяет создать бинарное изображение, у которого значения различных пикселей объектов исходного изображения установлены в 1, а значения остальных пикселей результирующего изображения установлены в 0.

Функция **bwarea** выполняет оценку площади объектов бинарного изображения, данный параметр является числом, значение которого приблизительно зависит от общего числа пикселов интенсивность которых выше заданного значения. Данный показатель служит численной оценкой степени травмированности семян.

	
Бинарное изображение зерна пшеницы с выбитым зародышем в ультрафиолетовом свете, полученное с использованием функции **bwperim,** с отсечкой по интенсивности 0,2	Бинарное изображение зерна пшеницы с выбитым зародышем в ультрафиолетовом свете, полученное с использованием функции bwarea
В изображении суммарное число белых пикселей 12144, что составляет 4,6% от общего числа пикселей. Таким образом, можно сказать о численном значении степени травмированности семян пшеницы Тр=4,6%.	
	
Бинарное изображение зерна пшеницы с сморщенными оболочками в ультрафиолетовом свете, полученное с использованием функции **bwperim,** с отсечкой по интенсивности 0,2	Бинарное изображение зерна пшеницы с сморщенными оболочками в ультрафиолетовом свете, полученное с использованием функции **bwarea**
В изображении суммарное число белых пикселей 18637, что составляет 7,1% от общего числа пикселей. Таким образом, можно сказать о численном значении степени травмированности семян пшеницы Тр=7,1%.	
	
Бинарное изображение зерна пшеницы с видимыми ушибами в ультрафиолетовом свете, полученное с использованием функции **bwperim,** с отсечкой по интенсивности 0,2	Бинарное изображение зерна пшеницы с видимыми ушибами в ультрафиолетовом свете, полученное с использованием функции **bwarea**
В изображении суммарное число белых пикселей 467210, что составляет 7,8% от общего числа пикселей. Таким образом, можно сказать о	

численном значении степени травмированности семян пшеницы Тр=7,8%.	
	
Бинарное изображение зерна пшеницы с видимыми ушибами и повреждённой оболочкой около зародыша в ультрафиолетовом свете, полученное с использованием функции **bwperim,** с отсечкой по интенсивности 0,2	Бинарное изображение зерна пшеницы с видимыми ушибами и повреждённой оболочкой около зародыша в ультрафиолетовом свете, полученное с использованием функции **bwarea**
В изображении суммарное число белых пикселей 689660, что составляет 6,2% от общего числа пикселей. Таким образом, можно сказать о численном значении степени травмированности семян пшеницы Тр=6,2%	

Выводы:

– Полученные результаты подтверждают возможность разделения целых и травмированных семян по спектральным характеристикам слоёв RGB

– Качество разделения по слоям RGB неудовлетворительное и может быть только оценкой для последующего разделения в УФ.

– УФ излучение позволяет увидеть места повреждения оболочек семян пшеницы и места поражения бактериями.

– Обработка изображений в УФ свете с помощью программы Matlab позволяет получить численное значение степени травмирований оболочек семян, путём отсечения по интенсивности полутонового изображения.

Заключение

В ходе написания данной работы была поставлена цель: исследовать процесс отделения микротравмированных семян зерновых культур от целых с использованием электротехнологий и разработать устройство, позволяющее отделять микротравмированные семена от целых.

Для достижения поставленной цели были выполнены следующие задачи:

– Разработан новый способ разделения микротравмированных и целых семян зерновых культур с использованием электротехнологий.

–Теоретически исследована математическая модель обработки цифровых фотографий для отделения семян зерновых культур по цветовым характеристикам.

–Разработаны устройство, методика и программы экспериментальных исследований процесса отделения микротравмированных семян зерновых культур от целых.

–Экспериментально установлены закономерности процесса отделения микротравмированных семян зерновых культур от целых и сравнены с теоретическим описанием математической модели.

Разработанная технология сепарации семян зерновых культур, способна значительно повысить урожайность зерновых культур.

Список использованной литературы:

1. Тарасенко А.П., Оробинский В.И., Мерчалова М.Э. Влияние влажности зерна при уборке и после уборочной обработке на его микротравмирование // Зерновые культуры №4. 1999, с. 22-24.
2. Фирсова М.К., Попова Е.П. Оценка качества зерна и семян. – М.: Колос, 1981. -223с.
3. Пугачев А.Н. Повреждение зерна машинами. - М., 1976. - 320 с.: ил.
4. Чазов С.А., Миттельман Г.С., Романов П.П. Семеноводство зерновых культур на Среднем Урале. - Свердловск, 1976. – 94 с.
5. Кропп Л.И. Обработка и хранение семенного зерна. М., «Колос», 1974. – 176 с.: ил.
6. Тарасенко А.П. Снижение микротравмирования семян при уборке и послеуборочной обработке. – Воронеж: ФГОУ ВПО ВГАУ, 2003. - 331 с.
7. Лебедев В.Б. Промышленное хранение и обработка семян. М.: Агропромиздат, 1991. – 255 с.
8. Карпов Б.А. Технология послеуборочной обработки и хранения зерна. М: Агропромиздат, 1987. – 288 с.: ил.
9. Косилов Н.И. Состояние и тенденции совершенствования зерноуборочных машин; Учебное пособие; Челябинск, 1983. – 99 с.
10. Совершенствование технологии уборки и послеуборочной обработки урожая зерновых, зернобобовых и крупяных культур в условиях Южного Урала / Бледных В.В., Косилов Н.И., Рогоза В.Е., Урайкин В.М.: ЧГАУ. – Челябинск, 1995. – 89 с.
11. Коронный электросепаратор: Патент на полезную модель №71566, по заявке №2006115994. Россия / Знаев А.С., Осинцев Е.Г.
12. Коронный электросепаратор семян: Патент на полезную модель №68366, по заявке №2006144880. Россия / Знаев А.С., Осинцев Е.Г.
13. Осинцев Е.Г. Разделение соразмерных частиц по электрическим свойствам на коронном электросепараторе // Энерго- и ресурсосбережение. Нетрадиционные и возобновляемые источники энергии: Сб. материалов Всерос. студенч. олимпиады, науч.-практ. конф. и выставки студентов, аспирантов и молодых ученых, 19-22 декабря 2006 г. - Екатеринбург: ГОУ ВПО УГТУ-УПИ, 2006, с. 156-159.
14. Осинцев Е.Г. Энерго- и ресурсосберегающие технологии в производстве семян зерновых культур // Энерго- и ресурсосбережение. Нетрадиционные и возобновляемые источники энергии: Сб. материалов

Всерос. студенч. олимпиады, науч.-практ. конф. и выставки студентов, аспирантов и молодых ученых, 6-9 декабря 2005 г. - Екатеринбург: ГОУ ВПО УГТУ-УПИ, 2005, с. 347-349.

15. Осинцев Е.Г. Использование СВЧ-полей в технологии производства семян зерновых культур // Материалы XLVI междунар. науч.-техн. конф. «Достижения науки – агропромышленному производству». Челябинск: ЧГАУ, 2007, с.13-17.

© Е.Г. Осинцев,
Д.В. Осинцева,
В.В. Бабкин, 2014

УДК 62

В.Г. Сазыкин[1], А.Г. Кудряков[2], С.А. Нетребко[3]
[1]д-р техн. наук, профессор, [2]канд. техн. наук, доцент
Кубанский государственный аграрный университет
[3]генеральный директор ООО «Центр управления проектами – Вектор»
г. Краснодар, Российская Федерация

ТЕОРЕТИЧЕСКИЙ И ПРАКТИЧЕСКИЙ АСПЕКТЫ ПОВЫШЕНИЯ НАДЕЖНОСТИ КАБЕЛЬНЫХ ЛИНИЙ ЭЛЕКТРОПЕРЕДАЧИ

Кабельные линии (КЛ) электропередачи напряжением 6–10 кВ, участвующие в электроснабжении большинства промышленных, городских и сельскохозяйственных объектов, имеют тенденцию к увеличению протяженности в связи с концентрацией предприятий в крупных населенных пунктах и городах, для которых КЛ являются основным видом распределительных электрических сетей. Кроме того, воздушные линии электропередачи из-за использования больших земельных площадей постепенно замещаются КЛ.

По официальным данным 1980–1990 гг., удельная повреждаемость КЛ 6–10 кВ в СССР составляла в среднем 3,5–7 на 100 км. В настоящее большая часть имеющихся КЛ напряжением 6–10 кВ эксплуатируются уже более 25 лет и характеризуются повышенной степенью технологических нарушений. Удельное количество повреждений, связанных с последующим ремонтом кабельных линий, составляет около 32/100 км в год, что превышает справочный показатель 7,5/100 км в год более чем в 4 раза [2, 5, 9, 12, 13].

Настоящее исследование на примере КЛ показывает направления решения задачи повышения надежности электроснабжения, включая в себя целый комплекс технических, экономических и организационных мероприятий.

Оценка внутренних неоднородностей и состояния изоляции кабельных линий [2, 4, 8, 9, 13, 14]**.**

Импульсная рефлектометия. Для выявления количества и места нахождения соединительных и концевых муфт, неоднородностей изоляции КЛ, вызванных коррозией оболочек или прорастанием водных дендритов в изоляции, нами использовались результаты рефлектометрии – зондирования КЛ с помощью коротких импульсов электрического поля и прием сигналов, отраженных от неоднородностей линий (рис. 1).

Прямоугольный импульс от рефлектометра «Рейс 305», двигаясь вдоль КЛ, затухает и отражается от участков изменения волнового сопротивления кабеля. Имеется ряд признаков, по которым определяется характер неоднородности. Отражение зондирующего импульса от участка с повышенной локальной емкостью из-за появления водных дендритов происходит с изменением полярности импульса на противоположную. Отражение зондирующего импульса от локального участка с повышенной индуктивностью идет с сохранением полярности отраженного сигнала.

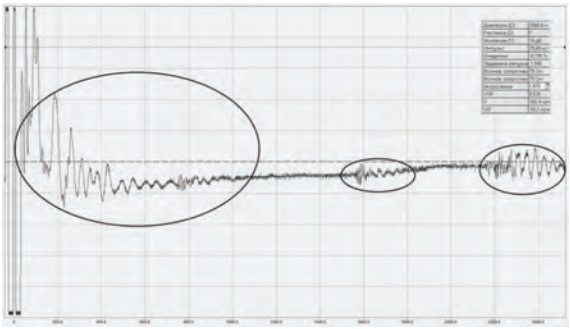


Рис. 1. Рефлектограмма участка КЛ
с выделенными неоднородностями

Получение информации о «внутреннем» состоянии КЛ с помощью рефлектометров, например, «Рейс-305» возможно во время определения места повреждения методом колебательного разряда, реализованном в составе электротехнической лаборатории (ЭТЛ). Сущность этого метода основана на бегущей волне напряжения: в поврежденную КЛ от источника выпрямленного испытательного напряжения, через присоединительное устройство КР-70, подают напряжение, которое плавно повышается до напряжения пробоя. В момент пробоя в кабеле возникает разряд колебательного характера, образуется две волны, одна из которых распространяется от места пробоя к началу кабеля, а другая – к концу кабеля. Величина сопротивления сопрягающего устройства КР-70 значительно больше волнового сопротивления линии. Первая волна, достигнув начала кабеля, отражается от

большого сопротивления устройства и, не изменяя полярности, распространяется к месту повреждения. В месте повреждения вновь возникает пробой и отражение с обратным знаком, и так далее до тех пор, пока энергии волны достаточно для пробоя в месте повреждения (рис. 2).

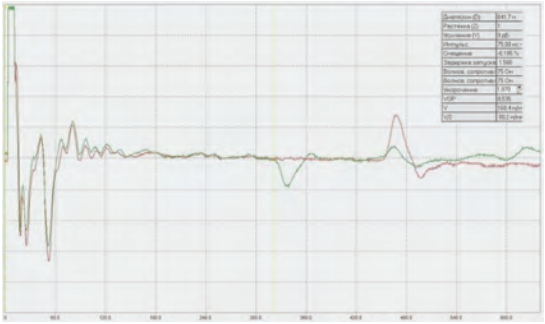


Рис. 2. Рефлектограмма КЗ, полученная методом колебательного разряда

Импульсный рефлектометр позволяет определять дефекты: обрыв кабеля, короткое замыкание жил кабеля, разбитость пар в кабеле, намокание кабеля,- а также обнаруживать наличие прочих устройств на кабельной линии: муфта, сростка кабеля, определять места параллельного подключения к кабелю. Кроме этого, импульсный рефлектометр позволяет определять множественные дефекты на кабеле и вычислять расстояния между ними.

Сравнение рефлектограмм, полученных в разное время, позволяет отмечать образование новых локальных дефектов КЛ и заблаговременно выполнить необходимые эксплуатационные мероприятия.

Профилактические испытания КЛ. Для разработки мероприятий по сокращению отказов в силовых КЛ требуется тщательное исследование причин технологических нарушений и принятие мер по сокращению внезапных отключений в электрических сетях. Однако в обследуемых районах согласно РД 34.45-51.300-97 «Объем и нормы испытаний электрооборудования» профилактические испытания КЛ шестикратным выпрямленным напряжением не проводятся по причине наличия КЛ со сроком эксплуатации более 15 лет, на которых удельное число отказов составляет 30/100 км в год.

Поэтому необходимо использовать другие методы исследования и критерии надежности КЛ и сопутствующей арматуры в ходе эксплуатации, в процессе замены и ввода нового электрооборудования. Такими доступными на сегодняшний день методами и критериями являются:

- опробованный метод импульсной рефлектометрии, реализуемый в мобильных ЭТЛ, оборудованных приборами «Рейс 105–305»;

- испытание КЛ напряжением сверхнизкой частоты 0,1 Гц вместо испытаний постоянным напряжением. Подобные испытания рекомендуются и для новых кабелей с изоляцией из сшитого полиэтилена;

- диагностика КЛ методом возвратного напряжения, основанная на измерении и анализе возвратного напряжения в изоляции каждой фазы кабеля после зарядки постоянным напряжением и кратковременной его разрядки с последующим определением состояния, степени старения и наличия влаги в бумажно-пропитанной изоляции силовых кабелей;

- определение величины $tg\delta$, позволяющей проверить наличие в изоляции воздушных включений и частичных разрядов, которые становятся причиной старения и последующего пробоя кабеля.

Испытания КЛ напряжением сверхнизкой частоты 0,1 Гц. Применительно к силовым кабелям с длительным (более 15 лет) сроком эксплуатации со всеми видами изоляцией и, в том числе, к новым кабелям с изоляцией из сшитого полиэтилена, необходим один из эффективных и экономичных, а также щадящий метод испытания напряжением сверхнизкой частоты (СНЧ).

Метод испытаний напряжением сверхнизкой частоты основан на применении пониженного уровня испытательного напряжения частоты 0,1 Гц косинусоидально-прямоугольной формы. При такой форме напряжения частоты 0,1 Гц процесс смены полярности происходит таким же образом, как и при напряжении синусоидальной формы промышленной частоты 50 Гц. То есть, кабель нагружается и испытывается подобно тестированию при частоте 50 Гц.

Кроме того, испытания при СНЧ со сменой полярности позволяют выявлять дефекты в изоляции без формирования остаточных объемных зарядов в структуре изоляции, в отличие от того, как это происходит при приложении постоянного напряжения. Накопление объемных зарядов в микронеоднородностях и включениях твердой изоляции при приложении постоянного напряжения приводит к снижению электрической прочности и пробою изоляции. Испытания же напряжением СНЧ не влияют на общее состояние материала изоляции. Поэтому, за рубежом кабели с изоляцией из сшитого полиэтилена испытываются исключительно напряжением сверхнизкой частоты.

При испытаниях кабелей с бумажно-пропитанной изоляцией, метод испытаний напряжением СНЧ позволяет в значительной степени уменьшить испытательное напряжение по сравнению с испытаниями постоянным напряжением. Главным из этих преимуществ является более высокая эффективность испытаний при более низком уровне испытательного напряжения, которое по величине не превышает более чем в 3 раза номинальное напряжение кабеля. Способ приложения испытательного напряжения и его уровень приводят к гарантированному пробою лишь при

наличии больших дефектов в изоляции КЛ вследствие высокой скорости увеличения канала пробоя и не допускают развития повреждений в более мелких дефектах изоляции КЛ при их испытаниях.

При проведении испытаний напряжением сверхнизкой частоты 0,1 Гц величина испытательного напряжения не превышает $3U_{ном}$ при вводе КЛ в эксплуатацию и $\sqrt{3}U_{ном}$ в процессе эксплуатации. Длительность испытаний одной фазы КЛ составляет 15 мин. при вводе КЛ в эксплуатацию и 30 мин в процессе эксплуатации. По мере накопления опыта испытаний режимы испытаний силовых КЛ могут уточняться и, соответственно, может быть повышена эффективность щадящих испытаний напряжением частоты сверхнизкой 0,1 Гц.

Протоколы испытаний КЛ, как и рефлектограммы, по нашему мнению, будут необходимыми для идентификации и паспортизации КЛ.

Диагностика КЛ методом возвратного напряжения. Метод измерения и анализа возвратного напряжения основан на измерении и анализе зависимостей от времени тока зарядки в процессе зарядки емкости кабеля постоянным напряжением небольшой величины, не оказывающей влияние на изоляцию кабеля и муфт, и восстанавливающегося (возвратного) напряжения в изоляции кабеля после его кратковременной разрядки. Эти зависимости характеризуют состояние, степень старения и содержание влаги в изоляции КЛ.

Оценка степени старения изоляции производится по максимальной величине возвратного напряжения, по скорости нарастания возвратного напряжения и по коэффициентам линейности (соотношение измеренных величин при разных значениях зарядного напряжения). Оценка степени увлажнения изоляции кабелей производится по величине тока зарядки (установившееся значение), характеризующей интенсивность процессов проводимости в изоляции.

Изоляция новых кабелей имеет малую интенсивность процессов поляризации и, соответственно, малую величину скорости нарастания возвратного напряжения. Для новых кабелей скорости нарастания возвратного напряжения при зарядных напряжениях 1 и 2 кВ не превышают 5 и 10 В/с, соответственно. Для кабелей с длительным сроком эксплуатации величина скорости нарастания возвратного напряжения в изоляции выше в 10–15 раз и более по сравнению с величиной, характерной для не состаренной бумажно-пропитанной изоляции.

Локализация частичных разрядов и определение величины tgδ. Анализ применяемых современных неразрушающих методов диагностики силовых КЛ показывает, что при переходе к техническому диагностированию одним из наиболее эффективных является метод измерения и локализации частичных разрядов (ЧР) осциллирующим затухающим напряжением.

Применение подобного метода позволяет определить величину ЧР, количество ЧР в локальных местах КЛ, напряжение возникновения и гашения

ЧР, величину емкости и тангенса угла диэлектрических потерь в изоляции. Использование этого метода позволяет не только получить информацию о техническом состоянии диагностируемых линий, не травмируя их изоляцию, но и локализовать имеющиеся проблемные места в КЛ с повышенным уровнем ЧР, что особенно актуально для КЛ с длительными сроками эксплуатации, приближающимися к нормативному сроку службы кабелей или превышающими их.

В силу новизны методики измерения характеристик ЧР в России отсутствуют общепризнанные нормативы оценки состояния КЛ по результатам измерения характеристик ЧР. В Европе уже разработаны критерии оценки результатов диагностики по уровню и интенсивности ЧР в силовых КЛ. Так, например, в Германии при диагностировании КЛ предельным значением принят уровень ЧР равный 1000 пКл, а в Италии – 1200 пКл. При превышении этих значений КЛ подлежит ремонту. Имеющиеся методики на основе созданных баз данных позволяют определить вид дефекта и его причину.

Применение в России разработанных за рубежом критериев диагностики по характеристикам ЧР пока не представляется целесообразным, так как в городских электрических сетях характерным является эксплуатация большинства силовых КЛ до их предельного состояния. При этом уровень ЧР в КЛ может достигать 10000 пКл и более.

Проводимые экспериментальные исследования в отечественной практике показали, что количество КЛ, имеющих дефекты с уровнем ЧР около 5000 пКл и выше составляет около 65 %, а по результатам диагностики был сделан вывод о том, что только около половины обследованных КЛ требуют полной или частичной замены, а другая половина КЛ требует ремонта только концевых или соединительных муфт (т.е. эти линии могут быть приведены в рабочее состояние с наименьшими затратами).

Таким образом, диагностирование ЧР, позволяющее оценить техническое состояние силовых КЛ с локализацией проблемных мест в них, дает возможность сократить число проблемных линий и продлить сроки эксплуатации длительно эксплуатирующихся КЛ сверх нормативного срока службы.

Одной из информативных характеристик, чувствительной к состоянию изоляции силовых кабелей является величина тангенса угла диэлектрических потерь ($tg\delta$) в изоляции КЛ. По результатам измерения $tg\delta$ изоляции кабелей в условиях эксплуатации при разных испытательных напряжениях и частотах также можно судить о состоянии и степени старения изоляции эксплуатирующихся кабелей. Информативным параметром старения изоляции является также и значение величины $tg\delta$ от приложенного напряжения, а также несимметрия параметра $tg\delta$ межфазной и основной изоляции.

Таким образом, определение величины *tgδ* позволяет проверить наличие в изоляции воздушных включений и частичных разрядов, которые становятся причиной старения и последующего пробоя кабеля.

Для измерения величины диэлектрических потерь в изоляции силовых кабелей применяются цифровые приборы, использующие мостовые схемы переменного тока, рассчитанные на эксплуатацию в составе передвижных ЭТЛ. Характерные их особенности: простота эксплуатации (после сборки схемы измерений и подачи напряжения все процессы автоматизированы), высокая помехозащищенность от внешних электромагнитных помех и от влияния искажений кривой испытательного напряжения, абсолютная безопасность персонала.

Организация технического диагностирования КЛ неразрушающими методами [2, 6, 8, 12, 13, 14, 18, 22]**.** Предлагаемый переход от испытаний повышенным напряжением к техническому диагностированию силовых КЛ неразрушающими методами является очень актуальным и своевременным, особенно в условиях, когда достигнуты значительные успехи в разработке эффективных неразрушающих методов диагностики силовых КЛ и соответствующего диагностического оборудования.

Возможность технического обслуживания и ремонта электрооборудования по результатам технического диагностирования оговорена «Правилами технической эксплуатации электроустановок потребителей». При функционировании у потребителя системы технического диагностирования, т.е. совокупности объекта диагностирования, процесса диагностирования и исполнителей, подготовленных к диагностированию и осуществляющих его по правилам, установленным соответствующей документацией: отраслевой стандарт, ведомственный руководящий документ, регламент, стандарт предприятия, другие документы, принятые в данной отрасли или у потребителя.

Оценка технического состояния изоляции электрооборудования с применением современных диагностических методов может быть выполнена различными способами: единовременный контроль технического состояния изоляции (единовременная диагностика); периодический контроль технического состояния изоляции с целью изучения динамики процессов старения изоляции и развития дефектов в изоляции во времени (периодическая диагностика); постоянный контроль технического состояния изоляции в каждый момент времени (мониторинг).

Постоянный контроль (мониторинг) технического состояния изоляции электрооборудования дает наибольший объем информации, но и влечет за собой большие эксплуатационные расходы. Поэтому его применение целесообразно только на особо ответственных объектах и объектах, имеющих очень большую стоимость. Поскольку при соблюдении правил эксплуатации силовых КЛ старение изоляции и развитие дефектов в изоляции происходит

относительно медленно, то в непрерывном контроле технического состояния эксплуатируемых силовых КЛ особой необходимости нет. Периодический контроль позволяет получить достаточную информацию о техническом состоянии силовых КЛ с наименьшими затратами.

Для внедрения технического диагностирования силовых КЛ с использованием неразрушающих методов необходимо иметь обоснованные нормативы оценки состояния силовых КЛ по результатам их диагностирования, а также регламентирующие документы по переходу к системе технического обслуживания и ремонта силовых КЛ по техническому состоянию и проведению такого обслуживания КЛ. Вопрос оценки результатов технического диагностирования и выдача обоснованного заключения о техническом состоянии КЛ является наиболее важным вопросом при переходе к системе технического обслуживания и ремонта силовых КЛ по их техническому состоянию.

Регламентирующие документы по переходу к системе технического обслуживания и ремонта силовых КЛ по техническому состоянию и проведению такого обслуживания КЛ должны предусматривать:

- планирование работ по техническому обслуживанию и ремонту КЛ;
- периодическое техническое обслуживание силовых КЛ, в том числе контрольные осмотры КЛ в соответствии с требованиями нормативных документов, регламентированное техническое обслуживание в соответствии нормами испытаний, плановое техническое обслуживание и мелкий ремонт;
- контроль технического состояния КЛ, включающий в себя контроль технических параметров по нормативным показателям и техническое диагностирование с помощью неразрушающих методов контроля состояния изоляции;
- проведение ремонтов силовых КЛ по техническому состоянию – планового и непланового (аварийного) ремонта;
- контроль качества эксплуатации, технического обслуживания и ремонта силовых КЛ.

Периодический контроль технического состояния силовых КЛ может осуществляться ЭТЛ, либо специализированными организациями, располагающими соответствующим диагностическим оборудованием и имеющим подготовленный персонал для его обслуживания.

По результатам технического диагностирования КЛ с использованием неразрушающих методов может быть принято решение о продлении срока эксплуатации силовых КЛ, отработавших нормативный срок службы (в соответствии с требованиями нормативно-технической документации), при условии, что обследованная КЛ находится в исправном техническом состоянии (т.е. отсутствуют проблемные места в КЛ) и КЛ обладает достаточным остаточным ресурсом для дальнейшей безаварийной работы.

При определении возможности дальнейшей эксплуатации КЛ может быть принято одно из решений:

- продолжение эксплуатации КЛ при установленных номинальных нагрузках (рабочее напряжение и ток нагрузки);
- продолжение эксплуатации КЛ с ограничением параметров по рабочему напряжению или току нагрузки;
- ремонт КЛ;
- вывод КЛ из эксплуатации.

При переходе к системе технического обслуживания, контроля технического состояния и ремонта силовых КЛ напряжением 6–10 кВ по их техническому состоянию может быть получен экономический эффект за счет: снижения количества аварийных ситуаций на КЛ и, соответственно, снижения затрат на их устранение; исключения затрат на проведение необоснованных ремонтов КЛ; повышения качества монтажных работ за счет проведения диагностирования КЛ при вводе линий в эксплуатацию или после их ремонта; выявления и устранения дефектов в КЛ на ранней стадии из развития; продления срока эксплуатации КЛ с невыработанным ресурсом изоляции; рационального планирования действительно необходимых ремонтов КЛ в обоснованные сроки; правильности и своевременности принятых решений на основании достоверной информации о реальном техническом состоянии КЛ.

Прогнозирование интервалов времени, обеспечивающих бесперебойное и качественное функционирование КЛ [1, 2, 7, 9, 12–14]**.** В настоящее время универсальных методов диагностики кабельных линий не существует, но применяются отдельные способы и/или их комбинации. Только комплексный подход при использовании различных методов диагностики (рис. 3) позволят дать количественную оценку интервалов времени остаточного ресурса кабелей.

Старение силовых кабелей среднего напряжения 6–10 кВ протекает по-разному для бумажной пропитанной изоляции, изоляции из сшитого полиэтилена кабельной композиции, изоляции из поливинилхлоридного пластиката (ПВХИ) или резины (РИ), поэтому и количественная оценка остаточного ресурса КЛ основана на различных механизмах старения.

Общими механизмами старения являются – тепловое, электрическое и механическое. Специфическими явлениями могут быть:

- для кабелей с бумажной пропитанной изоляцией – снижение сопротивления изоляции и рост $tg\delta$ из-за старения пропитывающего состава и бумажных лент, образование воздушных пор из-за стекания вязкой пропитки, образование воскообразных отложений под действием частичных разрядов в масляных прослойках и воздушных включениях между слоями бумаги;

Рис. 3. Комплекс различных методов диагностики КЛ

- для кабелей с СПЭ – образование древовидных каналов неполного пробоя – дендритов; электрические дендриты образуются под действием сильного электрического поля, водные дендриты – в результате проникновения воды в толщу изоляции; вода проникает в радиальном направлении - сквозь полимерные оболочки, а в осевом направлении – вдоль многопроволочных жил;

- для кабелей с ПВХИ – снижение эластичности изоляции из-за миграции и улетучивания пластификаторов, деструкция поливинилхлоридной смолы с выделением хлористого водорода.

Независимо от механизмов старения общими признаками этих медленных процессов в изоляции кабелей, которые могут наблюдаться при контроле в эксплуатационных условиях, являются: снижение сопротивления изоляции (рост токов утечки при испытаниях постоянным напряжением); увеличение $tg\delta$; увеличение коэффициента абсорбции; увеличение уровня частичных разрядов; появление локальных неоднородностей.

Грубые дефекты, появившиеся в изоляции в процессе эксплуатации, рекомендуется выявлять, путем испытаний повышенным напряжением сверхнизкой частоты. Рекомендуемые для электрических сетей параметры контроля кабелей приведены в табл. 1.

Таблица 1 – Контролируемые параметры КЛ месте эксплуатации и в лабораторных условиях

Конструкционные характеристики кабеля	Параметры, контролируемые на месте эксплуатации	Параметры, контролируемые в лабораторных условиях
Изоляция жил		
1. Бумажно-масляная изоляция		
1. Кабели с бумажной пропитанной изоляцией	$R_{из}$, $U_{исп}$, [C, tgδ, C(U), tgδ (U]	$R_{из}(T)$, $U_{исп}$, C(f), tgδ(f), $U_{пр}$, $n_{ч}$, $U_{в}$, $y_{р}$, Дl/l, , Перегиб N
2. Полиэтиленовая изоляция		
2.1. Кабельные композиции на основе полиэтилена	$R_{из}$, $U_{исп}$, [C, tgδ, C(U), tgδ(U), Рефл], $U_{в}$	$R_{из}(T)$, C(f), tgδ(f), $U_{пр}$, $n_{ч}$, $U_{в.з.}$, $y_{р}$, Дl/l, Перегиб
2.2. Полиэтилен, сшитый пероксидами (термореактивный материал)		$R_{из}(T)$, C(f), tgδ(f), $U_{пр}$, $n_{ч}$, $U_{в}$, $y_{р}$, Дl/l, Перегиб
2.3. Химически сшитый полиэтилен (термореактвный материал)		$R_{из}(T)$, C(f), tgδ(f), $U_{пр}$, $n_{ч}$, $U_{в}$, $y_{р}$, Дl/l, Перегиб
3. ПВХ изоляция		
3. Изоляция на основе ПВХ пластиката	$R_{из}$, $U_{исп}$, [M, C, tgδ]	$R_{из}(T)$, C(f), tgδ(f), $U_{пр}$, $U_{в}$, $y_{р}$, Дl/l, Дm/m$^{2)}$, Перегиб
4. Резиновая изоляция		
4. Резиновая изоляция	$R_{из}$, $U_{исп}$, [M]	$U_{исп}$, $R_{из}(T)$, C(f), tgδ(f), $U_{пр}$, $y_{р}$, Дl/l , Перегиб
Защитная оболочка		
1. Алюминий	$R_{из.з.обол.}$	Перегиб
2. Свинец		
3. ПВХ пластикат	M	$U_{исп}$, $y_{р}$, Дl/l, Перегиб
Экраны		
1 Оплетка медным нелуженым проводом	$R_{опл}$, [$R_{э}(U)$]	Перегиб, $ДR_{э}/R_{э}$
2 Оплетка медным луженым проводом	$R_{опл}$, [$R_{э}(U)$]	Перегиб, Дl/l
Жилы		
1 Однопроволочная	$R_{ж}$	$R_{ж}$, $y_{р}$, Дl/l
2 Многопроволочная	$R_{ж}$, [$R_{э}(U)$]	$R_{ж}$

Примечание: *[…]* – параметры, измерение которых выполняется в случаях наличия явных признаков старения; $R_{из}$ – сопротивление изоляции, Ом; $U_{исп}$ – испытательное напряжение, кВ; *M* – модуль упругости при вдавливании индентора, Н/м; *C* – емкость, Ф; *tgδ* – тангенс угла диэлектрических потерь; *C(U), tgδ (U)* – зависимости от напряжения емкости и тангенса угла диэлектрических потерь, получаемые с помощью высоковольтного моста (моста Шеринга); *Рефл* – рефлектограммы трасс кабелей; $U_{в}$ – восстанавливающееся напряжение, используемое для оценки накопления объемных зарядов; $R_{из.з.обол}$ – сопротивление изоляции защитной оболочки (как показатель ее целостности); $R_{ж}$ – сопротивление жилы на постоянном токе, Ом; $R_{э}(U)$ – сопротивление экрана в зависимости от напряжения (по крайней

мере, при двух уровнях напряжения: низком и высоком) – характеристика наличия окисных пленок; $R_{опл}$ – сопротивление оплетки, Ом; $R_{из}(T)$ – сопротивление изоляции в диапазоне температур (от 20 до 150 ^{o}C в зависимости от материала); $C(f)$, $tg\delta$ (f) – емкость и тангенс угла диэлектрических потерь в диапазоне частот от 0,1 до 10 кГц; $U_{пр}$ – испытательное напряжении при проверке радиальной герметичности; $n_{чр}$ – измерение характеристик частичных разрядов; N – испытания на прочность методом двойных перегибов; $U_р$, $Дl/l$ – разрывное напряжение и относительное удлинение при разрыве; $ДRэ/Rэ$ – относительное изменение сопротивления экранов; *Перегиб* – испытания на двойной перегиб кабелей.

Критерии количественной оценки остаточного ресурса кабелей. Токи утечки и сопротивление изоляции [2, 9, 11–14]**.** Контроль токов утечки I_y выполняется в настоящее время при испытаниях силовых кабелей постоянным напряжением. Допустимая величина I_y кабелей напряжением свыше 1 кВ не нормируется, однако считается, что I_y < 300 мкА при максимальном испытательном напряжении. Признак наличия дефекта в изоляции характеризуется медленным спадом тока утечки или его нарастанием, особенно при полном испытательном напряжении. Признаком дефекта является также асимметрия ΔI_y токов утечек соседних фаз: $\Delta I_y > 10$ мкА.

Контроль сопротивления изоляции Rиз выполняется мегомметрами с выходным напряжением $U_{вых}$ = 2500 В. Нормируемая величина погонного сопротивления $R_{из}$, приведенная к температуре 20 ^{o}C, составляет: для кабелей с БПИ – $R_{из} \geq 200$ МОм·км при напряжении 6 и 10 кВ; для кабелей с ПВХИ – $R_{из} \geq 50$ МОм·км; для кабелей с СПЭ – $R_{из} \geq 150$ МОм·км.

Для наблюдения дрейфа сопротивления изоляции в процессе эксплуатации кабелей необходимо выделить представительные трассы кабелей, так как измерения сопротивления всех трасс будет технически трудно осуществимо. Потребуется использование цифровых тераомметров. При этом следует иметь в виду, что измерение больших сопротивлений (свыше 1000 МОм) будет корректным только в том случае, если будет исключено влияние токов утечки по поверхности изоляции. Для этого тераомметры выполняют с тремя выводами, два из которых включаются в цепь измеряемого тока, протекающего сквозь объем контролируемой изоляции, а третий (экранирующий) – служит для перехвата токов утечки изоляции.

Освоение техники измерения сопротивления изоляции протяженных кабельных трасс (а не контроля по допусковому принципу, как это делается сейчас) потребует учета ряда проблем: влияние емкостных токов заряда кабельной линии - для защиты от которых понадобится на некоторое время шунтировать чувствительный измерительный прибор, а наблюдение спадания зарядного тока вести менее чувствительным прибором; влияние внешних электростатических и электромагнитных полей от соседних КЛ, находящихся под напряжением; учет влияния температуры кабеля на результаты измерений

сопротивления его изоляции; необходимость относительно длительной выдержки под напряжением до достижения установившегося значения тока утечки сквозь изоляцию.

Значительно более информативным показателем состояния изоляции, чем ее сопротивление, является кривая спада во времени зарядного тока $i_{v(ф)}$. Она отражает процессы накопления объемных зарядов – абсорбцию. Малая величина тока $i_{v(ф)}$ и длительное время его установления служат признаком качественной изоляции. Наоборот – большая величина $i_{v(ф)}$ и быстрое достижение ним установившегося значения – признак состаренной или увлажненной изоляции. Мерой абсорбционных процессов служит отношение сопротивлений изоляции в разные моменты времени с начала измерений, например, на 30-й секунде (R30), 60-й секунде (R60) или 600-й секунде (R600): R60/ R30 или R600/ R60. Приняты следующие критерии качества изоляции по коэффициенту абсорбции R600/ R60:

$$R_{600}/\,R_{60} = \begin{cases} <1 & опасная \\ 1-2 & сомнительная \\ 2-4 & хорошая \\ >4 & отличная \end{cases}.$$

Для более качественной изоляции, спадание тока абсорбции в которой идет быстро, удобнее использовать коэффициент абсорбции вида R60/ R30:

$$R_{60}/\,R_{30} = \begin{cases} <1{,}25 & опасная \\ 1{,}25-1{,}6 & хорошая \\ >1{,}6 & отличная \end{cases}.$$

Современные средства измерений на основе цифровых автоматически масштабируемых измерителей тока позволяют по-новому решить задачу диагностики состояния изоляции по абсорбционным характеристикам: кривая сопротивления фиксируется на всем интервале измерений, а не на двух – трех фиксированных моментах времени.

Емкость кабеля и тангенс угла диэлектрических потерь [9, 13, 14]**.** Емкость сама по себе не является диагностическим параметром силовых кабелей, контрольных и управления. Однако ее измерение в совокупности с измерением сопротивления позволяет определить постоянную времени изоляции $\theta = RC$. Постоянная времени (как и тангенс угла диэлектрических потерь $tg\delta$) является показателем, не зависящим от длины кабеля и толщины изоляции. Поэтому по параметру и можно выполнить объективное сравнение качества изоляции разных кабелей и выбрать наиболее состаренный.

Современные цифровые мультиметры позволяют выполнять измерение емкости на низком напряжении с точностью, достаточной для оценки постоянную времени изоляции.

Величина $tg\delta$ определяет долю реактивной энергии, превращаемой в тепло при работе кабеля на переменном напряжении. Обычно $tg\delta < 0{,}01$ или 1%. Различают измерения $tg\delta$ при высоком напряжении и при низком напряжении.

При измерениях на высоком напряжении проверяется наличие в изоляции воздушных включений и частичных разрядов, которые могут стать причиной старения и пробоя кабеля. Признаком этого является увеличение $tg\delta$ с ростом напряжения. Снятие так называемой «ионизационной кривой» – зависимости $tg\delta$ от напряжения в интервале напряжений от $0{,}5U_0$ до $2U_0$ является эффективным способом контроля качества изоляции.

Для кабелей с БПИ на напряжение U_0 = 10 кВ нормируется следующее значение $tg\delta$ согласно ГОСТ 18410-73: $tg\delta \le 0{,}8\%$ при $U = 0{,}5 \cdot U_0 = 5$ кВ.

Для кабелей, имеющих уровень $tg\delta$ выше 0,8%, необходимо проводить повторные измерения через 1 год. Быстрая деградация какого-либо кабеля отразится на росте его тангенса угла диэлектрических потерь. Своевременное обнаружение этого процесса позволит предсказать момент приближающегося пробоя. Приращение тангенса угла диэлектрических потерь при росте напряжения от $0{,}5U_0$ до $1{,}25U_0$, т.е. от 5 до 12,5 кВ, отражающее развитие ЧР в изоляции, должно составлять: $\Delta tg\delta \le 0{,}3\%$ – для вязкой пропитки; $\Delta tg\delta \le 0{,}8\%$ – для нестекающей пропитки.

Пороговые значения $tg\delta$ определены нормативными документами только для новых силовых кабелей напряжением 10 кВ и выше. Для изношенных кабелей, длительно находящихся в эксплуатации, таких норм нет.

Процессы старения изоляции неизбежно ведут к увеличению $tg\delta$. Поэтому измерения $tg\delta$, выполненные даже при низком напряжении, отражают старение изоляции.

Сравнивая результаты измерений на постоянном и переменном напряжении, можно уточнить характер дефекта:

1) если постоянная времени саморазряда мала (θ < 1–10 с), и $tg\delta$ относительно низкий ($tg\delta$ < 0,5–1%), то причиной дефекта есть локальный участок с малой емкостью, т.е., возможно, муфта;

2) если постоянная времени саморазряда большая (θ > 10–100 с), и $tg\delta$ относительно высокий ($tg\delta$ > 1–2 %), то дефектным элементом является кабель;

3) признаками нормального состояния изоляции КЛ являются высокая постоянная времени саморазряда (θ > 10–100 с) и низкий уровень $tg\delta$ ($tg\delta$ < 0,5–1%);

4) когда постоянная времени саморазряда мала (θ < 1–10 с) и вместе с тем уровень $tg\delta$ – высокий ($tg\delta$ > 1–2 %) ситуация должна интерпретироваться как случай, когда дефективными являются и муфта и кабель.

Возможные соотношения параметров $\theta = RC$ и $tg\delta$ приведены в табл. 2.

Таблица 2 – Признаки дефектов элементов КЛ с БПИ

Постоянная времени, с	$tg\delta$ < 0,5–1	$tg\delta$ > 1–2

$\theta < 1$–10	Повреждена муфта	Повреждены муфта и кабель
$\theta > 10$–100	Нормальное состояние	Поврежден кабель

Уровень частичных разрядов [12–14]**.** Основной причиной старения высоковольтной изоляции являются частичные разряды – пробои воздушных включений в твердой изоляции либо масляных пленок в КЛ с БПИ. При снятии «ионизационной кривой» получают интегральную оценку мощности, рассеиваемой на ЧР. Чувствительность такой оценки недостаточно высока. Прямое измерение характеристик ЧР – путь к увеличению чувствительности и распознавания видов дефектов в кабеле.

Частичный разряд это пробой небольшой части изоляционного промежутка. Он сопровождается скачкообразным снижением напряжения на изоляции всего на 0,1–1 мВ, что трудно заметить на фоне высокого рабочего напряжения 6–10 кВ. Единичный ЧР не представляет особой опасности, т.к. приводит к разрушению весьма малого объема изоляции. Однако на переменном напряжении ЧР могут возникать каждый полупериод, и частота составит свыше 100 Гц. Длительное действие ЧР наносит существенный вред изоляции.

ЧР приводит к возникновению во внешней электрической цепи коротких импульсов тока длительностью менее 1 мкс и переносу электрического заряда q. Этот заряд называется кажущимся, и его можно измерить. Истинный заряд, протекающий при ЧР во включении и приводящий к разрушению изоляции, недоступен для прямых измерений. Он много больше кажущегося заряда. Допустимый уровень кажущегося заряда ЧР при испытаниях новых кабелей с БПИ составляет $q \leq (10–20)\cdot 10^{-12}$ Кл = 10–20 пКл. Он определен путем сопоставления фактического ресурса кабелей с первоначальным уровнем ЧР, измеренным в новом изделии. Для кабелей с СПЭ этот уровень сейчас существенно снижен – до 2–5 пКл, т.к. полимерная изоляция менее стойкая к действию ЧР по сравнению с БПИ.

На основе анализа практических результатов диагностики эксплуатирующихся силовых КЛ были предложены нормативные показатели оценки состояния изоляции силовых КЛ как с БПИ, так с СПЭ и ПВХИ. Оценка технического состояния КЛ производится по наихудшему из трех диагностируемых параметров: максимальная величина ЧР в локальном месте, напряжение возникновения ЧР (амплитудное значение), среднее количество ЧР в локальном месте за

один цикл измерений. Экспертные показатели параметров ЧР для оценки состояния изоляции КЛ 6 кВ приведены в табл. 3.

Таблица 3 – Экспертные предельные показатели параметров ЧР для оценки состояния изоляции КЛ с БПИ

Предельные показатели параметров			Оценка состояния изоляции КЛ	Заключение по результатам диагностирования
Максимальная величина ЧР в локальном месте, q, пКл	Среднее количество ЧР в локальном месте за один цикл измерений, n, шт./сек	Напряжение возникновения ЧР (амплитудное значение), U_m, кВ		
до 1200	до 0,25	свыше 8,2	«Хорошее» состояние	Эксплуатация КЛ без ограничений. Последующее диагностирование через 5 лет
1200 – 7500	0,25 – 0,5	8,2 – 5,9	«Удовлетворительное» состояние	Последующее диагностирование через 1 год.
7500 – 15000	0,5 – 1,5	5,9 – 3,2	«Неудовлетворительное» состояние	Ремонт в течение одного года с последующим диагностированием
свыше 15000	свыше 1,5	свыше 3,2	«Предпробивное» состояние	КЛ эксплуатации не подлежит. Срочный ремонт с диагностированием

Соответственно приведенной в табл. 3 градации по срокам диагностирования и ремонта КЛ возможно ввести нормативы по величине напряжения возникновения ЧР и по среднему количеству ЧР в локальном месте.

Максимальное значение ЧР в локальном месте КЛ, пКл. Необходимый срок диагностирования или ремонта КЛ: до 1200. КЛ подлежит повторному диагностированию в течение 5 лет; от 1200 до 7500. КЛ подлежит повторному диагностированию в течение одного года; от 7500 до 15000. КЛ подлежит ремонту в течение одного года с последующей диагностикой; свыше 15000. КЛ не подлежит эксплуатации.

Гибкость и эластичность изоляционных оболочек [8, 9, 13, 14]**.** Оболочки кабелей, выполненные из поливинилхлоридных (ПВХ)-пластикатов или шланговых резин, со временем утрачивают свою гибкость и эластичность. Это можно установить, проводя обследование оболочек методом вдавливания индентора (пенетрационный метод). Форма индентора для обследования кабельных оболочек и усилие, прилагаемое к нему, выбираются такими, чтобы обследование не повредило качественную оболочку. Отношение приложенного усилия к глубине вдавливания индентора в полимер определяет так называемый модуль упругости $M = F/x$, Н/мм. Ориентировочные значения модуля сжатия в исходном состоянии равны: M = 10–30 Н/мм – для ПВХ-пластикатов; M = 4–7 Н/мм – для кабельных резин. Предельные значения

модуля сжатия для материалов, срок эксплуатации которых считается исчерпанным: $M_{кр}$ = 86 Н/мм – для ПВХ-пластикатов; $M_{кр}$ = 22 Н/мм – для кабельных резин.

Механический двойной перегиб [9, 14]**.** Наиболее достоверным методом определения ресурса кабелей с БПИ является механический двойной перегиб образцов БПИ изоляции. Этот метод многократно проверен и позволяет с достаточной степенью точности определить оставшийся ресурс бумаги, используемой в изоляции изделия. В исходном состоянии для кабельных бумаг число двойных перегибов, выдерживаемых на излом, должно превышать $N > 2000$. Критическое значение параметра N, при котором ресурс бумажно-масляной изоляции можно считать исчерпанным, составляет $N \approx 10$. Проверив несколько десятков кабелей, измерив их параметры и сопоставив их значения с результатами испытаний бумаги на двойной перегиб, можно статистически определить допустимые границы изменений этих параметров.

Принятие мер, компенсирующих или устраняющих выявленные отклонения и недостатки по результатам диагностики [1, 2, 6–9, 12–14]**.** Таким образом, если получить данные о величинах θ и $tg\delta$ кабелей, сопоставить их с результатами диагностик другими методами: частичных разрядов; механического двойного перегиба и др., то можно получить предельные значения изоляции кабелей, соответствующим износу и дать количественную оценку временных интервалов остаточного ресурса КЛ для составления графика их замены.

По результатам проведенных работ составляется акт обследования технического состояния кабелей. Акт составляется на основании протоколов испытаний и проверок, который содержит ссылки на эти протоколы.

Решение о продлении срока эксплуатации кабелей принимается на основании соответствия результатов проведенных работ согласно перечню табл. 2 и установленным критериям.

В Решении должны быть указаны принятые меры, компенсирующие или устраняющие выявленные отклонения и недостатки. В Решении должны быть установлены: возможность продления срока эксплуатации; новый регламентированный срок эксплуатации; условия (мероприятия), выполнение которых необходимо для продления срока эксплуатации.

Срок продления эксплуатации определяется сроком проведения следующего обследования в ходе технической диагностики.

При несоответствии диагностических параметров требованиям эксплуатационной и нормативной документации проводится дальнейший анализ. При соответствии значений диагностических параметров критериям работоспособности состояние ВЛ оценивается как «неисправное работоспособное», и разрабатываются рекомендации по технической эксплуатации или проведению восстановительного ремонта дефектных

элементов. В противном случае техническое состояние КЛ оценивается как «неработоспособное».

При соответствии состояния КЛ «неработоспособному» рассматривается технико-экономическое обоснование возможности перевода КЛ в «работоспособное» состояние посредством восстановительного ремонта.

Основные направления формирования системы повышения надежности и продления сроков службы изношенного электрооборудования [7, 10–14, 17, 21]**.** На основании Положения о технической политике в электросетевом комплексе должен быть разработан пакет нормативно-технических и методических документов, определяющих правила применения технических требований и решений Положения в процессе реализации программ нового строительства, расширения, реконструкции и технического перевооружения сетей. Цель технической политики заключается в эффективном управлении активами компании, определении при этом оптимальных условий и основных технических направлений обеспечения надежного и безопасного электроснабжения потребителей.

В методологическом плане необходимо: внедрение новых методов и средств диагностики; проведение комплексной диагностики; использование компонентов новой информационной технологии; совершенствование нормативно-методического обеспечения.

Внедрение новых методов и средств диагностики. Система диагностики, предотвращая аварийные отказы изношенного электрооборудования (ИЭО) [3, 12, 16, 19], должна прогнозировать возможность безаварийной дальнейшей работы СЭС в течение определенного промежутка времени с целью определения времени следующего сеанса контроля и необходимого обслуживания электрооборудования (ЭО). Выявление дефекта требуется для его оценки, локализации и последующего устранения. Уточнение вида и характера дефекта с помощью новых средств диагностики и анализ причин повреждений ИЭО позволяют не только повысить надежность диагноза, но и наметить пути разработки перспективных методов и средств технического обслуживания и ремонта (ТОР) ЭО.

Комплексная диагностика. Уже не требует доказательства тот факт, что только комплексный подход и многопараметрический диагностический анализ позволяют всесторонне оценить техническое состояние ЭО, накопить информацию для изучения особенностей и закономерностей его изменения, более обоснованно прогнозировать дальнейшую работу ЭО.

В потоке анализируемых параметров большое место занимает качественная (синтаксическая, семантическая смысловая, нормативно-техническая) и субъективная (присущая «человеческому фактору» в принятии решений) информация, которая не может быть адекватно формализована известными математическими методами. В подобных случаях проблема может быть

решена, путем отказа от традиционных математических моделей и применения понятии размытости, методов теории нечеткой логики. Использование лингвистического подхода обеспечивает количественное описание моделей ИЭО при нечеткой входной информации. Значения переменных и характеристики отношений между ними представляются не только числами, но и предложениями на естественном языке.

Поскольку при комплексной диагностике может применяться нечеткая или неполная информация, представленная нечетким множеством, словесным лингвистическим выражением или лингвистической переменной, для получения управляющих воздействий в этих случаях нужна интеллектуальная дополнительная обработка входной информации – доопределение и формализация до вида, возможного к использованию для принятия решения.

Использование компонентов новой информационной технологии [12, 15, 19, 20]. Процесс комплексной диагностики многостадиен. Начальным и наиболее важным этапом является формирование модели, дающей адекватную информацию о функционировании ЭО. Распознавание неисправностей ИЭО численными методами эффективно при наличии математической модели процесса развития повреждений. Классическая математическая модель представляет собой сложную систему нелинейных дифференциальных уравнений высокого порядка. В практической математической модели используются линейные дифференциальные уравнения. При быстром развитии дефектов систему уравнений необходимо решать в реальном времени для управления и обнаружения неисправностей.

На следующем этапе для принятия правильного решения необходимо оптимальное критериальное сравнение, приближающее информативность входного описания к характеру возникающих ситуаций. Затем после оптимизации выбранных признаков находится наилучший алгоритм принятия решений. В большинстве случаев для ИЭО характерны нелинейная динамика развития повреждений и возникновение непредвиденных ситуаций [12, 16]. Поэтому к принятию решений привлекаются эксперты и используются методы, основанные на моделировании знаний и эвристик высококвалифицированных специалистов при помощи стратегий дедуктивного и нечеткого вывода. Решения на основе методов нечеткой логики позволяют давать заключения по доступной исходной числовой и лингвистической информации с помощью ЭС, адаптивных алгоритмов распознавания образов и нейронных сетей. Для быстрого принятия решения с помощью нужной текстовой информации эффективно использование гипертекстовых ссылок.

Совершенствование нормативно-методического обеспечения. Проведенный анализ аспектов эксплуатации ЭО [1, 3, 5, 10 11, 17-20] позволяет сформулировать следующие положения совершенствования рассматриваемого вида обеспечения:

1) эксплуатация ИЭО требует изменений в большом наборе нормативно-методической документации (НМД). Необходима разработка новой НМД по проведению контроля, ревизии и испытания ИЭО, ведению режимов.

2. Формы НМД по ТОР ЭО должны быть ориентированы на создание, хранение и обработку в ЭВМ, использование в компонентах новой информационной технологии. Необходимо однотипное описание входных параметров для последующей интеллектуальной обработки качественных показателей и выявления скрытой (вторичной) диагностической информации.

Одним из направлений решения информационной составляющей проблемы должно стать создание информационного массива баз данных и знаний на основе практики внедрения новых методик и средств ТОР ЭО. Положительный эффект от создания баз знаний (БЗ) заключается в описании используемой предметной области в структурированном формализованном виде с привлечением различных типов знаний. Это дает возможность систематизировать собственные знания, преодолеть действующие шаблонные условия и правила, привести собственные знания в соответствие с текущими условиями ТОР для принятия обоснованных решений. Накопленная информация позволит качественно оценить значимость и применимость различных методов, выработать рекомендации по их использованию для различных видов ЭО, быстрее и рациональнее организовывать диагностические службы, оказывать помощь при создании и утверждении НМД. Интеллектуальные БЗ помогут уменьшить объем избыточной информации, обрабатывая поступающие и накапливаемые в базе данных (БД) сведения. Задача создания информационного массива связана с организационными аспектами перехода к новым формам ТОР ЭО.

Основные организационные аспекты реализуют идею *электрогериатрии* (ЭГТ) [12, 15–20]. Процесс электрогериатрии – техническое обслуживание и ремонт электрооборудования, имеющего в своем составе ИЭО, направлен на решение сложных комплексных задач, осуществление укрупненных операций по эксплуатации ЭО. При этом принципиальное значение приобретают согласованность, взаимообусловленность и взаимное дополнение действий. В разрабатываемой модели новой системы ТОР СЭО происходит реорганизация текущего хода действий. В организованных подразделениях диагностики различные рабочие процедуры трансформируются в одно целое. Для практической реализации создается специальный коллектив (команда). Подобное горизонтальное сжатие процесса в ходе электрогериатрии многократно повышает эффективность работы за счет сокращения времени ее выполнения и численности исполнителей, Здесь очень важно, что меняется управленческий подход, работниками принимаются самостоятельные решения. Происходит не только горизонтальное, но и вертикальное сжатие процессов. Там, где имела место традиционная организация работ, исполнитель для принятия решений должен был обращаться к руководству. Сейчас он

принимает решения самостоятельно при поддержке компонентов новой информационной технологии и системы мониторинга. Расширение полномочий сотрудников, повышение роли каждого из них в процессе ТОР приводят к значительному росту отдачи от их труда. Не менее существенно и то, что сам процесс ТОР реализуется в естественном порядке, ЭГТ переходит от линейного упорядоченного выполнения рабочих процедур к распараллеливанию и синхронизации процессов. Кроме того, разные процессы имеют различные варианты исполнения. Традиционный процесс ТОР реализуется на основе четких инструкций. Но сегодня производство проводит адаптацию ТОР к новым сложившимся условиям, переходу к системе, обладающей гибкими версиями исполнения. Выбор программы действий делается в соответствии с конкретной ситуацией состояния ЭО (СЭО).

Еще одним важным моментом является организация выполнения работы в том месте и так, где и как это целесообразно, а не по функциональному принципу. ЭГТ повышает эффективность работы за счет упрощения иерархического деления отделов предприятия на службы. При этом существенно ограничивается число проверок и управляющих воздействий, значительно уменьшается количество согласовании. Тестирование новой появляющейся организационной модели, ее предварительное применение в ограниченном масштабе уже подтвердило выявленные положительные тенденции [12, 15, 19].

Формирование новых функций персонала и изменение требований к подготовке сотрудников предполагают переход от курсов обучения к профессиональному образованию. В связи с многоплановостью и динамичностью работ, ориентированных на процессы ТОР СЭО, предприятия теперь должны заботиться не только об организации обучающих курсов, но и о непрерывном профессиональном образовании, повышении компетентности обслуживающего персонала. Основной акцент при этом делается на использование новых информационных технологий [12, 21].

На этом первом этапе осуществляется постановка задач, уточнение цели переходящих к ЭГТ подразделений предприятия, исходя из общей стратегии, потребностей, уровня производства, текущего положения предприятия. ЭГТ, по мнению авторов, целесообразна в трех основных случаях:

1) ТОР ЭО предприятия находится в состоянии кризиса, связанного с высоким уровнем издержек, низким качеством ТОР, повышенной аварийностью ЭО и особенно ИЭО. Ситуация кризиса усугубляется фактами уменьшения квалифицированного персонала, отсутствием устоявшихся структур и процедур, минимально отвечающих требованиям Системы ТОР ЭО, низким уровнем управления;

2) текущее положение в части ТОР ЭО может быть удовлетворительным, однако прогнозы дальнейшей деятельности неблагоприятны. Предприятие начинает ощущать тенденции отрицательного влияния ИЭО и быстро

реагирует на негативные изменения обстановки, пока они не приобрели еще необратимого для него характера;

3) реализацией ЭГТ занимаются благополучные, динамично развивающиеся предприятия. Их задача состоит в ускоренном наращивании положительных и уникальных возможностей, которые дает ЭГТ.

Применение методов ЭГТ в этой ситуации является одним из лучших вариантов ведения хозяйствования. Игнорирование, застой в части инноваций со временем приводит к тому, что предприятия все хуже адаптируются к появлению новых, ранее не учитываемых факторов. Поэтому ЭГТ является средством для сохранения устойчивого курса предприятий в подобных условиях. Последующие этапы перехода к реализации ЭГТ состоят из типовых процедур.

1. Вырабатывается желаемый и необходимый с точки зрения будущего развития прообраз ЭГТ. Формирование будущего прототипа происходит в рамках разработки стратегии предприятия и его основных ориентиров. Правильный выбор целей согласно ЭГТ означает, что найдены направления, которые действительно могут быть существенно улучшены и являются жизненно важными для данного предприятия.

2. Создается модель-описание существующего процесса ТОР ЭО для реконструкции системы действий и работ, при помощи которых подразделения предприятия реализуют функции ЭГТ. Производится детальное описание и документирование основных операций, оценивается их эффективность. В создании модели используются результаты исследований и анализа проблемных компонентов технических, организационных, методологических и экономических аспектов. Определяются процессы, нуждающиеся в коренной перестройке.

3. Разрабатывается модель нового процесса ЭГТ. Для этого необходимы следующие действия:

- перепроектирование выбранных хозяйственных процессов. Создаются более эффективные рабочие процедуры. Определяются инновационные и информационные технологии, способы их применения;

-создание новых функций персонала. Перерабатываются должностные инструкции, определяется оптимальная система мотивации, организуются рабочие команды, разрабатываются программы подготовки и переподготовки кадров;

- формирование информационной системы, необходимой для осуществления и поддержки ЭГТ. Определяется техническое, программное и другие необходимые виды обеспечения, формируются специализированные информационные подсистемы АСУТП и АСУЭ;

- тестирование новой модели ЭГТ путем ее предварительного ограниченного применения на предприятии – осуществление пробных пилотных проектов с

последующим совершенствованием и оптимизацией функций ЭГТ на основе результатов внедрения подобных проектов.

Важно изменить управленческий подход, передать членам команды полномочия для принятия самостоятельных решений. Расширение полномочий сотрудников, повышение компетентности и роли каждого из них в рабочем процессе приводит к значительному росту производительности труда.

4. Окончательно внедряется модель новой системы ЭГТ на предприятии. На этом этапе важно умело осуществить соединение старых процессов с новыми. Динамичность и преемственность перехода во многом определяется степенью тщательности подготовительных работ.

Выводы

1. К основным рекомендациям по оценке внутренних неоднородностей и состояния изоляции КЛ относится необходимость использования импульсной рефлектометрии для выявления количества и места установки соединительных и концевых муфт, неоднородностей КЛ, вызванных коррозией оболочек или прорастанием водных дендритов в изоляции.

Получение информации о «внутреннем» состоянии КЛ с помощью рефлектометров возможно во время определения места повреждения методом колебательного разряда, реализованном в составе ЭТЛ. Сравнение рефлектограмм, полученных в разное время, позволяет отмечать образование новых локальных дефектов КЛ и заблаговременно выполнить необходимые эксплуатационные мероприятия. Протоколы испытаний КЛ, как и рефлектограммы, будут необходимыми для идентификации и паспортизации КЛ.

2. При разработке мероприятий по сокращению отказов в КЛ требуется тщательное исследование причин технологических нарушений и принятие мер по сокращению внезапных отключений в электрических сетях. Поэтому необходимо использовать методы исследования и критерии надежности КЛ и сопутствующей арматуры в ходе эксплуатации, в процессе замены и ввода нового электрооборудования. Такими доступными на сегодняшний день методами и критериями являются:

- уже опробованный метод импульсной рефлектометрии, реализуемый в мобильных ЭТЛ, оборудованных диагностическими приборами «Рейс»;

- испытание КЛ напряжением сверхнизкой частоты 0,1 Гц вместо применяемых ранее испытаний постоянным напряжением (которые также не проводится). Подобные испытания рекомендуются и для новых кабелей с изоляцией из сшитого полиэтилена;

- диагностика КЛ методом возвратного напряжения, основанная на измерении и анализе возвратного напряжения в изоляции каждой фазы кабеля после зарядки постоянным напряжением и кратковременной его разрядки с последующим определением состояния, степени старения и наличия влаги в бумажно-пропитанной изоляции кабелей;

- определение величины $tg\delta$, позволяющей проверить наличие в изоляции воздушных включений и частичных разрядов, которые становятся причиной старения и последующего пробоя кабеля.

С использованием неразрушающих методов контроля и получаемых результатов диагностики возможно определение остаточного ресурса КЛ и выполнение эксплуатационных мероприятий, технического обслуживания и ремонта «по состоянию электрооборудования», значительно влияющих на дальнейшую технологию надежного функционирования всего сетевого комплекса.

3. Оценка технического состояния изоляции электрооборудования с применением современных диагностических методов может быть выполнена различными способами:

- единовременный контроль технического состояния изоляции (единовременная диагностика);
- периодический контроль технического состояния изоляции с целью изучения динамики процессов старения изоляции и развития дефектов в изоляции во времени (периодическая диагностика);
- постоянный контроль технического состояния изоляции в каждый момент времени (мониторинг).

Постоянный контроль (мониторинг) технического состояния изоляции электрооборудования дает наибольший объем информации, но и влечет за собой большие эксплуатационные расходы. Поэтому его применение целесообразно только на особо ответственных объектах. Поскольку при соблюдении правил эксплуатации силовых КЛ естественное старение изоляции и развитие дефектов в изоляции происходит относительно медленно, то в непрерывном контроле технического состояния эксплуатируемых силовых КЛ особой необходимости нет. Периодический контроль позволяет получить достаточную информацию о техническом состоянии силовых КЛ с наименьшими затратами.

4. Для внедрения технического диагностирования силовых КЛ с использованием неразрушающих методов необходимо иметь обоснованные нормативы оценки состояния силовых КЛ по результатам их диагностирования, а также регламентирующие документы по переходу к системе технического обслуживания и ремонта силовых КЛ по техническому состоянию и проведению такого обслуживания КЛ. Вопрос оценки результатов диагностирования и выдача обоснованного заключения о техническом состоянии продиагностированных КЛ является наиболее важным вопросом при переходе к системе технического обслуживания и ремонта силовых КЛ по их техническому состоянию.

Периодический контроль технического состояния силовых КЛ может осуществляться ЭТЛ, либо специализированными организациями,

располагающими соответствующим диагностическим оборудованием и имеющим подготовленный персонал для его обслуживания.

По результатам технического диагностирования КЛ с использованием неразрушающих методов может быть принято решение о продлении срока эксплуатации силовых КЛ, отработавших нормативный срок службы (в соответствии с требованиями нормативно-технической документации), при условии, что обследованная КЛ находится в исправном техническом состоянии (т.е. отсутствуют проблемные места в КЛ) и КЛ обладает достаточным остаточным ресурсом для дальнейшей безаварийной работы.

При определении возможности дальнейшей эксплуатации КЛ может быть принято одно из решений: продолжение эксплуатации КЛ при установленных номинальных нагрузках (рабочее напряжение и ток нагрузки); продолжение эксплуатации КЛ с ограничением параметров по рабочему напряжению или току нагрузки; ремонт КЛ; вывод КЛ из эксплуатации.

5. В связи с тем, что хранящаяся информация никак не используется в целях повышения надежности функционирования КЛ, часть ее утеряна, часть – не отражается должным образом в отчетной документации. Поэтому необходима разработка алгоритма сбора и хранения информации о состоянии КЛ и воздействующих на нее факторах в виде, удобном для проведения качественного инженерного и статистического анализа.

Отсутствие подробной и объективной информации о техническом состоянии приводит к эксплуатации электрооборудования и сети только по наработке на отказ. Такая эксплуатация электрооборудования и сети ведет к большим производственным потерям и необоснованному распылению средств на его техническое восстановление и ремонт. Поэтому, сценарий обслуживания и продление сроков эксплуатации необходимо реализовывать в соответствии с действительным техническим состоянием оборудования и участков электрической сети.

6. При переходе к рекомендуемой системе технического обслуживания, контроля технического состояния и ремонта силовых КЛ напряжением 6–10 кВ по их техническому состоянию может быть получен существенный экономический эффект за счет: снижения количества аварийных ситуаций на КЛ и, соответственно, снижения затрат на их устранение; исключения затрат на проведение необоснованных ремонтов КЛ; повышения качества монтажных работ за счет проведения инструментального диагностирования КЛ при вводе линий в эксплуатацию или после их ремонта; выявления и устранения дефектов в КЛ на ранней стадии их развития; продления срока эксплуатации КЛ с невыработанным ресурсом изоляции; рационального планирования действительно необходимых ремонтов КЛ в обоснованные сроки; правильности и своевременности принятых решений на основании достоверной информации о реальном техническом состоянии КЛ.

7. Формирование внутрикорпоративной системы повышения надежности и продления сроков службы изношенного электрооборудования определяет совокупность управленческих, технических и организационных мероприятий на ближайшую и долгосрочную перспективу, направленных на повышение технического уровня, надежности и безопасности электрических сетей на основе апробированных при эксплуатации, научно обоснованных технических решений и технологий.

Список использованной литературы:

1. Афанасьев Н. А., Юсипов М. А. Система технического обслуживания и ремонта оборудования энергохозяйств промышленных предприятий (система ТОР ЭО). – М.: Энергоатомиздат, 1989.

2. Канискин В., Таджибаев А. Определение остаточного ресурса силовых кабелей неразрушающая диагностика // Новости Электротехники. – 2003, № 2.

3. Кудряков А. Г., Сазыкин В. Г. Причины появления изношенного электрооборудования. The Third International Conference on Eurasian Scientific Development. Proceedings of the Conference (December 2014). «East West» Association for Advanced Studies and Higher Education GmbH. – Vienna, 2014.

4. Кудряков А.Г., Сазыкин В.Г., Сильченков А.С. Профилактические испытания кабельных линий (КЛ): Fundamental And Applied Sciences Today IV. Vol. 1. Материалы IV международной научно-практической конференции Фундаментальные и прикладные науки сегодня (октябрь 2014). Том 1. – North Charleston, USA, spc Academic. – 2014.

5. Кудряков А. Г., Сазыкин В. Г., Холодняк С.В. Техническое состояние агропромышленных кабельных линий напряжением 6–10 кВ: Актуальные проблемы энергетики АПК: Материалы V Международной научно-практической конференции (апрель 2014). – Саратов: Буква. – 2014.

6. Кустов А.Г. Существует ли в России диагностика силовых кабельных линий и электрооборудования // Энергетика и промышленность России. – 2006, № 7.

7. Кучеров Ю.Н., Нечаев В.В. Концепция обеспечения надежности как основа гармонизации экономического и нормативного управления в электроэнергетике. // Энергетик. – 2005, № 2.

8. Лавров Ю.А. Кабели 6–35 кВ с пластмассовой изоляцией. Факторы эксплуатационной надежности // Новости ЭлектроТехники. – 2006, № 1.

9. Набока Б.Г., Беспрозванных А.В., Москвитин Е.С., Бутко М.В., Бутко С.М., Головань А.А. Критерии по тангенсу угла диэлектрических потерь для оценки технического состояния силовых кабелей с бумажно-пропитанной изоляцией в эксплуатации // Вісник НТУ «ХПІ». – 2010, № 55.

10. Нетребко С.А., Сазыкин В.Г. Техническое состояние городских кабельных линий напряжением 6–10 кВ: Материалы пятнадцатой всероссийской научно-технической конференции «Пути повышения

надежности, эффективности и безопасности энергетического производства». – Дивноморск. – 2012.

11. Нетребко С.А., Сазыкин В.Г. Управление надежностью городских электрических сетей напряжением 6–10 кВ: Материалы четырнадцатой всероссийской научно-технической конференции «Пути повышения надежности, эффективности и безопасности энергетического производства». – Дивноморск. – 2011.

12. Перспективы повышения эффективности электроэнергетического комплекса Кубани. Электрогериатрия – совершенствование эксплуатации изношенного электрооборудования: монография / В.Г. Сазыкин, А.Г. Кудряков, С.А. Нетребко, В.В. Пронь. – Краснодар: КубГАУ. – 2012.

13. Привалов И.Н. Современные методы и технические средства для испытаний и диагностики силовых кабельных линий номинальным напряжением до 35 кВ включительно. – Санкт-Петербург: Петербургский энергетический институт повышения квалификации руководящих работников и специалистов. – 2008.

14. Программа управления старением кабелей АЭС. – НАЭК «Энергоатом». – 2004.

15. Сазыкин В. Г. Электрогериатрия – новая технология эксплуатации электрооборудования // Промышленная энергетика. – 2000, № 11.

16. Сазыкин В. Г. Системный подход к проблеме изношенного электрооборудования // Электрика. – 2001, № 4.

17. Сазыкин В.Г., Кудряков А.Г. Продление сроков эксплуатации изношенного электрооборудования. Наука, образование, общество: тенденции и перспективы: Сборник научных трудов по материалам Международной научно-практической конференции 28 ноября 2014 г.: в 5 частях. Часть III. – М.: «АР-Консалт». – 2014 г.

18. Сазыкин В.Г., Кудряков А.Г., Николаев А.М. Организация технического диагностирования силовых кабелей неразрушающими методами. Academic Science – Problems and Achievements V. Vol. 2. Материалы V международной научно-практической конференции: Академическая наука – проблемы и достижения (декабрь 2014). Том 2. – North Charleston, USA, spc Academic. – 2014.

19. Сазыкин В.Г., Кудряков А.Г., Пронь В.В. Анализ проблем и возможностей эксплуатации изношенного электрооборудования. Мировая наука и образование в условиях современного общества: Сборник научных трудов по материалам Международной научно-практической конференции (октябрь 2014): в 4 частях. Часть II. – М.: «АР-Консалт». – 2014.

20. Сазыкин В.Г., Кудряков А.Г., Пронь В.В., Сильченков А.В. Проблемы организации эксплуатации изношенного электрооборудования: Проблемы экономики, организации и управления в России и мире: Материалы VI

международной научно-практической конференции (октябрь 2014). – Прага, Чешская Республика: Изд. WORLD PRESS s.r.o. – 2014.

21. Сазыкина О.В., Кудряков А.Г., Сазыкин В.Г. Организация нейросетевого прогнозирования хозяйственной деятельности предприятия. Наука, образование, общество: тенденции и перспективы: Сборник научных трудов по материалам Международной научно-практической конференции (ноябрь 2014): в 5 частях. Часть III. – М.: «АР-Консалт». – 2014.

22. Султанов Г.А., Сазыкин В.Г., Кудряков А.Г., Кучеренко Д.Е. Устройства и методы для определения мест повреждения кабельных линий: Сборник научных статей по итогам Международной научно-практической конференции (сентябрь 2014), г. Санкт-Петербург. – СПб.: Изд-во «КультИнформПресс». – 2014.

© В.Г. Сазыкин, А.Г. Кудряков, С.А. Нетребко, 2014

УДК 62

А. Ю. Чебан
к.т.н., научный сотрудник
Институт горного дела ДВО РАН
г. Хабаровск, Российская Федерация

ТЕХНИЧЕСКОЕ ОСНАЩЕНИЕ ГОРНОДОБЫВАЮЩИХ ПРЕДПРИЯТИЙ ЮГА ДАЛЬНЕВОСТОЧНОГО ФЕДЕРАЛЬНОГО ОКРУГА

Роль горнодобывающей промышленности в экономике регионов России

Российская Федерация по объему добычи полезных ископаемых и их доле в валовом внутреннем продукте может быть отнесена к странам с развитой горной промышленностью [1, с. 2]. По добыче полезных ископаемых в стоимостном выражении первое место занимает Уральский федеральный округ, прежде всего за счет освоения месторождений углеводородного сырья (таблица 1). Дальневосточный Федеральный округ (ДФО) по объему добычи полезных ископаемых находится на третьем месте из восьми федеральных округов. Доля добывающей отрасли в структуре валового регионального продукта (ВРП) федеральных округов варьируется от 0,8% в Центральном и Северо-Кавказском округах до 36,7% в Уральском округе, в среднем по стране доля добывающей отрасли в 2012 году составила около 11% [2]. В ДФО наибольшие объемы добычи полезных ископаемых приходятся на Сахалинскую область и Республику Саха (Якутия). В этих двух регионах, а также в Чукотском автономном округе и Амурской области, в структуре ВРП на первом месте находится добыча полезных ископаемых (таблица 2). В

Дальневосточных регионах ведется добыча углеводородного сырья, драгоценных металлов, алмазов, железных руд, бурого и каменного угля, строительных горных пород, меди, цинка, кобальта, вольфрама, олова, сурьмы, бора, германия и других полезных ископаемых [3, с. 165]. Доля добывающей промышленности в структуре ВРП ДФО составляет более 27%, что говорит о сырьевой направленности экономики федерального округа.

Таблица 1. Доля добывающей отрасли в валовом региональном продукте (ВРП) федеральных округов в 2012 году

Федеральный округ	Добыча полезных ископаемых, млрд. руб.	Доля в структуре ВРП, %	ВРП на душу населения, тыс. руб.
1. Уральский	2567	36,2	583
2. Поволжский	989	12,5	266
3. Дальневосточный	732	27,1	431
4. Сибирский	680	13,2	267
5. Северо-Западный	368	7,0	384
6. Центральный	139	0,8	452
7. Южный	92	2,9	228
8. Северо-Кавказский	10	0,8	128

Таблица 2. Доля добывающей отрасли в валовом региональном продукте (ВРП) субъектов ДФО в 2012 году

Регион	Добыча полезных ископаемых, млрд. руб.	Доля в структуре ВРП, %	ВРП на душу населения, тыс. руб.
1. Сахалинская область	395,5	61,6	1300
2. Республика Саха (Якутия)	231,7	42,9	565
3. Амурская область	34,2	14,6	286
4. Хабаровский край	28,6	6,6	323
5. Чукотский автономный округ	17,2	35,2	960
6. Магаданская область	14,3	18,6	501
7. Приморский край	6,7	1,2	285
8. Камчатский край	5,6	4,4	396
9. Еврейская автономная область	0,3	0,5	245

Необходимо отметить, что регионы с максимальной долей добывающей отрасли в структуре ВРП (Сахалинская область, Республика Саха (Якутия) и

Чукотский автономный округ) имеют также и лучшие удельные показатели ВРП на душу населения (таблица 2).

Горнодобывающая промышленность южных регионов ДФО

В данной работе объектом исследования является *техническая оснащенность горнодобывающих предприятий* юга Дальнего Востока России, а именно четырех регионов ДФО: Амурской области, Хабаровского и Приморского краев, Еврейской автономной области (ЕАО). Автором рассмотрено техническое оснащение предприятий ведущих разработку более 320 месторождений различных полезных ископаемых открытым способом. Наибольшее количество предприятий занимается разработкой месторождений строительных горных пород и драгоценных металлов (таблица 3). Во всех четырех регионах ведется добыча угля. Разрабатываются месторождения вольфрама, железной руды, германия, цинка, плавикошпатового сырья и торфа.

Таблица 3. Количество предприятий ($N_П$) и количество разрабатываемых месторождений ($N_М$) по регионам

Полезные ископаемые	Регион								Всего	
	Амурская область		Хабаровский край		Приморский край		ЕАО			
	$N_П$	$N_М$	$N_П$	$N_М$	$N_П$	$N_М$	$N_П$	$N_М$	$N_П$	$N_М$
1. Драгоценные металлы (золото, платина, серебро):	38	102	18	31	5	6	2	2	63	141
- в т.ч. россыпное золото	35	97	12	21	4	4	2	2	53	124
2. Уголь	2	4	1	1	6	9	1	1	10	15
3. Строительные горные породы	21	25	27	37	36	82	14	18	98	162
- в т.ч. русловые месторождения	2	2	3	8	3	3	-	-	8	13
4. Другие полезные ископаемые	1	1	-	-	4	7	2	2	7	9

Горное оборудование на добыче драгоценных металлов

В южных регионах ДФО ведется добыча золота, платины и серебра. Золото добывается во всех четырех рассматриваемых регионах, серебро - в Амурской области, Хабаровском и Приморском краях, платина - в Хабаровском крае. Наибольшие объемы в стоимостном выражении приходятся на добычу золота. Лидером среди Дальневосточных субъектов по добыче золота является Амурская область, в которой в 2013 году было добыто 31,0т золота [4, с. 4].

Сохранение высоких объемов добычи драгоценных металлов при постепенном ухудшении качества разрабатываемых месторождений происходит, прежде всего, за счет увеличения объемов перерабатываемой горной массы, что обуславливает необходимость применения все более мощного горного оборудования [5, с. 31]. В рассматриваемых регионах в 2013 году было добыто около 52 тонн золота [4, с. 4], что составило 44% добычи ДФО или 23,6% общероссийской добычи золота. В Амурской области и Хабаровском крае основной объем драгоценных металлов добывается из коренных месторождений, в Приморском крае и ЕАО объемы добываемого металла невелики и получаются в основном из россыпных месторождений. Крупнейшими предприятиями, ведущими добычу драгоценных металлов, являются ОАО «Покровский рудник», ЗАО «Многовершинное», ОАО «Охотская ГГК», ЗАО «А/с Амур», ООО «Березитовый рудник», ОАО «Прииск Соловьевский» и др.

В результате положительной динамики роста цен на драгоценные металлы в предыдущие годы, предприятия смогли получить значительную дополнительную прибыль, часть которой направили на обновление парков горного оборудования. При разработке месторождений открытым способом предприятия используют одноковшовые экскаваторы, бульдозеры, погрузчики, буровые станки, автосамосвалы, промывочные приборы, драги и другое горное оборудование. Наиболее распространенными горными машинами, задействованными на разработке месторождений драгоценных металлов, являются бульдозеры (таблица 4), составляющие на предприятиях ведущих разработку россыпей основу парка машин. Бульдозеры классифицируются по тяговому усилию (тяговому классу) и по мощности двигателя N базовой машины: легкие $N \leq 80$кВт, средние $80 < N \leq 150$кВт, тяжелые $150 < N \leq 300$кВт и сверхтяжелые $N > 300$кВт [6, с. 192].

Таблица 4 Структура бульдозерных парков предприятий, разрабатывающих месторождения драгоценных металлов

Фирмы-производители	Общее количество бульдозеров, ед	Численность бульдозеров по классам, ед.		
		Средние	Тяжелые	Сверхтяжелые
Отечественные производители				

ОАО «Промтрактор»	289	73	100	116
ЧТЗ-Уралтрак	266	260	6	-
Всего	555	333	106	116
Зарубежные производители				
Komatsu	216	27	20	169
Shantui	76	33	43	-
Caterpillar	75	11	6	58
Прочие	15	2	10	3
Всего	382	73	79	230
Итого бульдозеров	**937**	**406**	**185**	**346**

Общий парк бульдозеров, рассматриваемых предприятий составляет 937 ед., и включает в себя машины среднего, тяжелого и сверхтяжелого классов. Отечественные производители представлены 555 машинами, что составляет 59,2% всех бульдозеров, в том числе 289 машин производства ОАО «Промтрактор» и 266 машин производства Челябинского тракторного завода (ЧТЗ-Уралтрак). ОАО «Промтрактор» в основном поставляет машины тяжелого и сверхтяжелого классов (бульдозеры на базе тракторов Т-15, Т-20, Т-25 и Т-35), а также бульдозеры среднего класса на базе трактора Т-11. Продукция Челябинского тракторного завода практически в полном объеме представлена средними бульдозерами на базе тракторов Т-130 и Т-170.

Крупнейшим зарубежным поставщиком бульдозеров является фирма Komatsu – 216 машин (23,1% всего парка бульдозеров), при этом 78,2% машин данной фирмы относятся к наиболее востребованному и высокопроизводительному сверхтяжелому классу бульдозеров (D-355, D-375 и D-475). Примерно по 8,0% парка составляют машины фирм Caterpillar (США) и Shantui (Китай). Фирма Caterpillar в основном представлена сверхтяжелыми машинами CAT-D9R и CAT-D10R, а китайский производитель – машинами среднего и тяжелого классов SD-16 и SD-32. На долю прочих зарубежных фирм (Mitsubisi, Dressta и др.) приходится всего 15 бульдозеров (1,6% парка) преимущественно тяжелого класса.

Несмотря на общее численное превосходство отечественных бульдозеров над импортными машинами, необходимо отметить, что 60% российских бульдозеров (333 из 555) – это машины среднего класса, в основном устаревших конструкций, производительность которых невелика. Основной объем работ по перемещению горной массы выполняется сверхтяжелыми бульдозерами, а в этой группе доля отечественных машин составляет 33,5% (116 машин из 346), в основном это бульдозеры на базе тракторов Т-35 и Т-500. Кроме того, импортные машины зачастую имеют более высокие эксплуатационные показатели, чем отечественные бульдозеры.

Одноковшовые экскаваторы задействованы в основном, на разработке рудных месторождений золота и серебра. Главным рабочим параметром

одноковшового экскаватора является вместимость ковша. Зарубежные фирмы имеют свои ряды значений вместимостей ковшей экскаваторов, которые отличаются друг от друга и от величин принятых в России. В связи с этим, автором принимается деление экскаваторов по вместимости ковша ($Е_к$) на четыре условных типоразмерных группы: первая группа экскаваторов с вместимостью ковша до 2,5м^3 включительно; вторая - с $Е_к$ свыше 2,5 до 5,0м^3; третья - с $Е_к$ свыше 5,0 до 10,0м^3 и четвертая - с $Е_к$ свыше 10,0м^3. Структура парка одноковшовых экскаваторов представлена в таблице 5. Общее число экскаваторов занятых на разработке месторождений драгоценных металлов составляет 138 единиц, в том числе отечественного производства 37 единиц (из них 17 экскаваторов ЭКГ-5А Уралмашзавода и 15 строительных экскаваторов с вместимостью ковша от 0,8 до 2м^3) или 26,8% всего парка.

Таблица 5 Структура парка одноковшовых экскаваторов предприятий, разрабатывающих месторождения драгоценных металлов

Фирмы-производители	Общее количество экскаваторов, ед	Численность экскаваторов по типоразмерным группам, ед			
		I группа	II группа	III группа	IV группа
Отечественные производители					
Уралмашзавод	17	-	-	17	-
Воронежский экскаваторный завод	7	7	-	-	-
Прочие	13	8	1	4	-
Всего	37	15	1	21	-
Зарубежные производители					
Komatsu	43	20	7	14	2
Caterpillar	29	21	-	8	-
Liebherr	9	-	4	-	5
Hitachi	8	2	3	3	-
Прочие	12	9	-	1	2
Всего	101	52	15	25	9
Итого экскаваторов	**138**	**67**	**16**	**46**	**9**

Парк экскаваторов зарубежного производства включает 101 единицу техники, охватывающие все четыре группы с различной вместимостью ковша, при этом необходимо учитывать, что импортные гидравлические экскаваторы более производительны, чем отечественные экскаваторы с аналогичными по объему ковшами с механическим приводом. Таким образом, можно утверждать что, в настоящее время предприятия, занимающиеся добычей драгметаллов, при формировании парка выемочных машин практически

полностью ориентированы на зарубежных производителей техники. Из зарубежных марок наибольшее распространение получили экскаваторы фирмы Komatsu различных типоразмеров, а именно PC-300, PC-400, PC-750, PC-1100, PC-2000 и др. Фирма Caterpillar в основном представлена небольшими экскаваторами CAT-330 с вместимостью ковша до 2,5м^3. Лидером по поставке крупных экскаваторов является фирма Liebherr. В небольшом количестве используются машины фирмы Hitachi и некоторых других производителей.

Фронтальные одноковшовые погрузчики на разработке месторождений драгоценных металлов получили ограниченное применение и в рассматриваемых регионах используются в количестве 35 единиц. В зависимости от грузоподъемности Q погрузчики делят на легкие - Q до 2 тонн, средние – Q до 5 тонн, тяжелые - Q до 10 тонн и сверхтяжелые – Q свыше 10 тонн [6, с. 175]. Большинство погрузчиков относятся к тяжелому классу, имеют грузоподъемность 6-8 тонн и вместимость ковша 3-5м^3. Одиннадцать погрузчиков (модели Komatsu WA-600, Caterpillar 990H, БелАЗ-78221 и др.) можно отнести к сверхтяжелым машинам, имеющим грузоподъемность 10-15 тонн и вместимость ковша 5-8м^3 (таблица 6). Погрузчики среднего класса используются в незначительном количестве на небольших объемах работ.

Таблица 6. Структура парка одноковшовых погрузчиков предприятий, разрабатывающих месторождения драгоценных металлов

Фирмы-производители	Общее количество погрузчиков, ед	Численность погрузчиков по классам, ед.		
		Средние	Тяжелые	Сверхтяжелые
МоАЗ	10	-	10	-
Caterpillar	8	-	-	8
Komatsu	6	-	3	3
Прочие	11	5	5	1
Итого погрузчиков	**35**	**5**	**18**	**12**

На промывке песков россыпных месторождений открытым раздельным способом в основном применяются промывочные приборы типа ПГШ (таблица 7). Более 98% всех промывочных приборов - отечественного производства, наибольшее распространение имеет прибор ПГШ-II-50 – 103 единицы, следующими по распространенности промывочными приборами являются ППГ-25 – 19 единиц и ГГМ-3 – 12 единиц. В качестве главного параметра промывочных установок принята их техническая часовая производительность, в соответствии с которой данные установки в основном и маркируются [7, с. 199].

Таблица 7. Структура парка промывочных приборов предприятий, разрабатывающих россыпные месторождения драгоценных металлов

Размер промывочного прибора и его техническая производительность П, $м^3/ч$	Регионы и количество промприборов, ед			Всего
	Амурская область	Хабаровский край	Приморский край и ЕАО	
1-й размер - $П \leq 25$ $м^3/ч$	18	1	1	20
2-й размер - $25 < П \leq 50$ $м^3/ч$	62	54	9	125
3-й размер - $50 < П \leq 100$ $м^3/ч$	11	8	1	20
4-й размер - $100 < П \leq 200$ $м^3/ч$	4	-	1	5
5-й размер - $П > 200$ $м^3/ч$	1	-	-	1
Итого промывочных приборов	**96**	**63**	**12**	**171**

При разработке россыпных месторождений золота на шести предприятиях Амурской области и Хабаровского края применяются 22 драги отечественного производства (таблица 8). В зависимости от вместимости черпака драги подразделяются на три группы: малолитражные – с вместимостью черпака до 100 литров; среднелитражные – с вместимостью черпака от 100 до 250 литров; крупнолитражные - с вместимостью черпака свыше 250 литров.

Подготовка горной массы к выемке при разработке рудных месторождений драгоценных металлов ведется с применением буровзрывных работ. На месторождениях задействовано 55 буровых установок, в том числе 33 легких буровых установки с массой 15-23 тонны и диаметрами получаемых скважин 85-152мм и 22 крупных буровых установки массой от 39 до 100 тонн и диаметрами получаемых скважин 127-311мм (таблица 9).

Таблица 8. Структура дражного флота предприятий, разрабатывающих россыпные месторождения драгоценных металлов

Типоразмер драги	Вместимость черпака, л	Регионы и число драг, ед		Всего
		Амурская область	Хабаровский край	
Малолитражные	50	1	-	1
Среднелитражные	150	2	-	2
	210	1	-	1
	250	14	2	16
Крупнолитражные	380	1	1	2
Итого драг		**19**	**3**	**22**

Таблица 9. Структура парка буровых установок предприятий, разрабатывающих рудные месторождения драгоценных металлов

Фирма-производитель	Легкие буровые установки, ед.	Крупные буровые установки, ед.	Всего
Atlas Copco	25	20	45
Tamrok	4	-	4
Прочие	4	2	6
Итого буровых установок	**33**	**22**	**55**

Около 95% буровых установок, используемых на предприятиях, импортного производства. Главным поставщиком данного класса оборудования является фирма Atlas Copco. Среди легких буровых установок наибольшее распространение получила модель ROC L8 – 14 единиц, а среди крупных модель DM 45 – 12 единиц.

Карьерные автосамосвалы в основном используются на предприятиях, занимающихся разработкой рудных месторождений драгоценных металлов. Вынутая экскаваторами и погрузчиками горная масса транспортируется автосамосвалами, парк карьерных автосамосвалов состоит из 339 машин (таблица 10). Крупнейшими поставщиками автомобильной техники являются фирмы БелАЗ, Volvo и Caterpillar.

Таблица 10. Структура парка карьерных автосамосвалов предприятий, разрабатывающих рудные месторождения драгоценных металлов

Фирма-производитель	Общее количество автосамосвало в, ед	Численность автосамосвалов (ед.) в зависимости от грузоподъемности, тонн		
		до 30	30-60	свыше 60
БелАЗ	163	5	158	-
Volvo	71	25	46	-
Caterpillar	62	-	26	36
Komatsu	22	-	12	10
Прочие	21	21	-	-
Итого автосамосвалов	**339**	**51**	**242**	**46**

Наиболее распространенными автосамосвалами являются БелАЗ-7547 грузоподъемностью 45 тонн - 146 машин, Volvo A40E грузоподъемностью 39 тонн - 46 машин и CAT 777 грузоподъемностью 90 тонн - 36 машин. В небольшом количестве используются автомобили других производителей.

Таким образом, именно на разработке месторождений драгоценных металлов наблюдается наибольшая концентрация современной техники отечественного и зарубежного производства.

Горное оборудование на добыче угля

Основные объемы добываемого угля поставляются на региональные тепловые электростанции и котельные, доля угольной электрогенерации на Дальнем Востоке превышает 40%. Постепенно растет доля высококачественного угля поставляемого в страны Азиатско-Тихоокеанского региона, в настоящее время именно экспорт качественных углей является перспективным направлением развития угольной отрасли. В 2012 году в Приморском крае было добыто 9,5 млн. т. угля, в Хабаровском крае – 5,1 млн.т., в Амурской области – 3,2 млн.т., в ЕАО – 0,01 млн.т. [8, с. 75]. Около 70% угля в регионах добывается открытым способом. В настоящее время в Чегдомыне построена обогатительная фабрика мощностью 6 млн.т. в год для улучшения качественных характеристик добываемого угля и повышения его конкурентоспособности на внутреннем и мировом рынке.

Проведен анализ парка горных машин десяти предприятий, ведущих добычу бурого и каменного угля на 15 разрезах регионов. Крупнейшими предприятиями, ведущими добычу угля, являются ОАО «Приморскуголь», СП РУ «Лучегорское», ОАО «Ургалуголь» и ООО «Амурский уголь». Годовой объем вскрыши на крупных разрезах достигает 10-20 млн.м^3. Для выемки пустой породы и добычи полезного ископаемого используются одноковшовые экскаваторы с механическим, электромеханическим или гидравлическим приводом, мощные бульдозерно-рыхлительные агрегаты [9, с. 82]. На крупных угольных разрезах задействована горная техника большой единичной мощности. Предприятия имеют крупный парк одноковшовых экскаваторов отечественного производства (таблица 11). Наибольшее распространение получили следующие машины: ЭКГ-5А – 17 единиц, ЭШ-10/70 – 10 единиц, ЭШ-15/90 – 9 единиц, ЭШ-20/90 – 6 единиц, ЭШ-11/70 – 4 единицы. Также на предприятиях имеется шесть роторных экскаваторов ЭР-1250. Необходимо отметить, что часть из перечисленного оборудования находится на консервации из-за неполной производственной загрузки разрезов.

Экскаваторы зарубежного производства на рассмотренных предприятиях составляют 24% от всего парка экскаваторов, в основном это машины с гидравлическим приводом рабочего оборудования. Данные машины составляют основу парка небольших и средних угледобывающих предприятий (с объемом добычи от 30 до 1000 тыс. тонн). Такие предприятия разрабатывают обычно один разрез и используют при проведении выемочных и погрузочных работ от одного до четырех экскаваторов, в связи с этим 83% зарубежных машин (34 из 41 единицы) относятся к первой и второй типоразмерным группам.

Таблица 11. Структура парка одноковшовых экскаваторов предприятий, разрабатывающих месторождения угля

Фирмы-производители	Общее количество экскаваторов, ед	Численность экскаваторов по типоразмерным группам, ед			
		I группа	II группа	III группа	IV группа
Отечественные производители (СССР, Россия, Украина)					
НКМЗ	53	-	-	26	27
Уралмашзавод	44	-	3	33	8
ИЗ «Картекс»	28	-	13	14	1
Прочие	5	1	-	-	4
Всего	130	1	16	73	40
Зарубежные производители					
Komatsu	14	5	3	5	1
Hitachi	13	4	6	1	3
Caterpillar	12	4	4	3	-
Прочие	2	2	-	-	-
Всего	41	15	13	9	4
Итого экскаваторов	**171**	**16**	**29**	**82**	**44**

Для выполнения вскрышных, подготовительных, вспомогательных и других горных работ на предприятиях используются бульдозеры (таблица 12). Наибольшее распространение получили бульдозеры производства ОАО «Промтрактор» на базе тракторов Т-20 и Т-11. Зарубежные производители в основном представлены сверхтяжелыми машинами, в том числе бульдозерами Komatsu D-375.

В небольшом количестве на выемочных и погрузочных работах используются одноковшовые колесные погрузчики с вместимостью ковша 3-5м^3 отечественного и зарубежного производства (таблица 13). В связи с незначительным количеством одноковшовых погрузчиков, применяемых на предприятиях регионов, в таблицу 13 также включены данные по погрузчикам, используемым при разработке месторождений строительных горных пород и прочих полезных ископаемых.

Таблица 12. Структура бульдозерных парков предприятий, разрабатывающих месторождения угля

Фирмы-производители	Общее количество бульдозеров, ед	Численность бульдозеров по классам, ед		
		Средние	Тяжелые	Сверхтяжелые
Отечественные производители				
ОАО «Промтрактор»	22	8	12	2

ЧТЗ-Уралтрак	5	3	2	-
Прочие	2	-	2	-
Всего	29	11	16	2
Зарубежные производители				
Komatsu	11	2	3	6
Caterpillar	9	2	4	3
Liebherr	5	-	-	5
Shantui	4	1	3	-
Прочие	4	2	2	-
Всего	33	7	12	14
Итого бульдозеров	**62**	**18**	**28**	**16**

Таблица 13. Структура парка одноковшовых погрузчиков предприятий, разрабатывающих месторождения угля, строительных горных пород и прочих полезных ископаемых

Фирмы-производители	Общее количество погрузчиков, ед	Численность погрузчиков по классам, ед.		
		Средние	Тяжелые	Сверхтяжелые
Komatsu	15	4	11	-
Liebherr	3	-	1	2
Stalowa Wola	3	-	3	-
Прочие	8	5	3	-
Итого погрузчиков	**29**	**9**	**18**	**2**

Ряд угольных месторождений разрабатывается с использованием буровзрывных работ. Наибольшее распространение при ведении буровых работ получили станки СВБ-2М, предназначенные для вращательного бурения скважин в породах с крепостью 1-6 по шкале Протодьяконова. Данные станки просты, надежны, имеют высокую проходимость и хорошие эксплуатационные характеристики.

Горное оборудование на добыче строительных горных пород

Анализ статистических данных за период с 2000 по 2011гг. показывает, что суммарный объем добычи строительных горных пород в четырех рассматриваемых регионах составлял от 61 до 69% общего объема добычи строительных горных пород в ДФО [10, с. 71]. Рассмотрено 98 предприятий, занимающихся разработкой 162 месторождений. Крупнейшими предприятиями, ведущими добычу строительных горных пород, являются ОАО «Первая нерудная компания», ОАО «Примавтодор», ОАО «Владивостокский бутощебеночный завод», ОАО «Спасскцемент», ОАО «Корфовский каменный карьер», ОАО «Хабаровский речной торговый порт», ООО «Амуркварц» и др.

Основу парков машин горнодобывающих предприятий составляют выемочные, выемочно-транспортирующие и транспортирующие горные машины, типоразмеры которых в зависимости от объемов добываемой и перерабатываемой горной массы значительно различаются. Наибольшее распространение на горных предприятиях, ведущих разработку строительных горных пород открытым способом, получили одноковшовые экскаваторы (таблица 14). Основу парка составляют небольшие машины - 77% экскаваторов относятся к первой условной типоразмерной группе, по своей производительности они вполне обеспечивают потребности предприятий, поскольку для большинства рассмотренных месторождений годовой объем добычи не превышает 20-150тыс.м^3. Отечественные экскаваторы составляют 58% всего парка, преимущественно это машины с вместимостью ковша 0,6-1,6м^3. Также используется существенное количество устаревших экскаваторов типа ЭКГ-5А и ЭКГ-4,6, которые применяются при разработке относительно крупных месторождений строительного камня и известняка.

Таблица 14. Структура парка одноковшовых экскаваторов предприятий, разрабатывающих месторождения строительных горных пород

Фирмы-производители	Общее количество экскаваторов, ед	Численность экскаваторов по типоразмерным группам, ед			
		I группа	II группа	III группа	IV группа
Отечественные производители					
Ковровский экскаваторный завод	33	33	-	-	-
Уралмашзавод	27	-	5	22	-
Воронежский экскаваторный завод	22	22	-	-	-
Прочие	29	29	-	-	-
Всего	111	84	5	22	-
Зарубежные производители					
Hitachi	26	19	7	-	-
Komatsu	17	14	2	1	-
Caterpillar	11	7	4	-	-
Прочие	27	24	2	1	-
Всего	81	64	15	2	-
Итого экскаваторов	**192**	**148**	**20**	**24**	**-**

Экскаваторы зарубежного производства преобладают во второй типоразмерной группе. Основным зарубежным поставщиком экскаваторов во всех четырех регионах является фирма Hitachi, на втором месте по численности

экскаваторов практически во всех регионах находится фирма Komatsu, тройку лидеров замыкает фирма Caterpillar. Машины прочих иностранных фирм - Kobelko, Doosan, Hyundai, Libherr, Mitsubishi и др. составляют 14,1% всего парка экскаваторов и 33,3% парка зарубежных машин.

Бульдозеры при разработке месторождений строительных горных пород в основном выполняют вскрышные, горно-подготовительные, зачистные и некоторые другие вспомогательные работы. Парк бульдозеров, рассматриваемых предприятий включает в себя машины среднего, тяжелого и сверхтяжелого классов (таблица 15).

Таблица 15. Структура бульдозерных парков предприятий, разрабатывающих месторождения строительных горных пород

Фирмы-производители	Общее количество бульдозеров, ед	Численность бульдозеров по классам, ед.		
		Средние	Тяжелые	Сверхтяжелые
Отечественные производители				
ЧТЗ-Уралтрак	79	79	-	-
ОАО «Промтрактор»	6	-	4	2
Всего	85	79	4	2
Зарубежные производители				
Komatsu	32	7	12	13
Caterpillar	11	4	4	3
Shantui	10	5	5	-
Прочие	7	4	3	-
Всего	60	20	24	16
Итого бульдозеров	**145**	**99**	**28**	**18**

Объемы перемещаемой бульдозерами горной массы невелики, так как мощность вскрыши обычно не превышает 0,3-1,0м, поэтому наибольшее распространение получили бульдозеры среднего класса. Бульдозеры тяжелого и сверхтяжелого класса используются в основном на крупных добывающих предприятиях при перемещении больших объемов породы на значительные расстояния. Среди отечественных машин наибольшее распространение получили бульдозеры на базе тракторов Т-130 и Т-170, среди зарубежных машин – тяжелые и сверхтяжелые бульдозеры Komatsu D-155 и D-355.

Транспортировка горной массы осуществляется автосамосвалами. Всего на рассматриваемых предприятиях эксплуатируются автосамосвалы шестнадцати производителей из России; Украины, Белоруссии, Японии, Китая и других стран. На большинстве предприятий (на 72 предприятиях из 98) используются автосамосвалы КамАЗ, составляя целиком весь транспортный парк организации, либо его часть совместно с машинами других производителей.

Наибольшее распространение получили автосамосвалы КамАЗ-55111. Большинство автосамосвалов имеет грузоподъемность 10-22 тонны. Карьерные самосвалы грузоподъемностью 27-45 тонн используются на четырнадцати наиболее крупных предприятиях, среди карьерных автосамосвалов наиболее распространен БелАЗ-7540.

При разработке крупных русловых месторождений песка и песчано-гравийных смесей используются земснаряды (проекта Р-109) и плавучие краны КПЛ-16/30 (проектов Р-108 и Р-19), добытые строительные горные породы транспортируются на баржах грузоподъемностью 1500 и 2500 тонн речными толкачами типа РТ-600. Более мелкие месторождения разрабатываются с использованием земснарядов типа 180-60 или С42-А, с использованием барж МП-600 (проект 942), буксиров-толкачей (проект 911Р) и буксирно-моторных катеров БМК-150. Разгрузка барж производится гидравлическими перегружателями или плавкранами.

Горное оборудование на добыче прочих полезных ископаемых

Рассмотрено также техническое оснащение семи горнодобывающих предприятий занимающихся разработкой девяти месторождений вольфрама, железной руды, германия, цинка, плавикошпатового сырья и торфа. Перечень задействованных предприятиями машин представлен в таблицах 13, 16 и 17.

Первая и вторая типоразмерные группы экскаваторов в основном представлены машинами зарубежного производства (таблица 16). Среди более крупных выемочных машин предприятий преобладают отечественные карьерные экскаваторы ЭКГ-5А. Средние и тяжелые бульдозеры предприятий в основном отечественного производства, сверхтяжелая группа в основном состоит из машин фирмы Caterpillar (таблица 17).

Таким образом, наибольшее количество горной техники и оборудования отечественных производителей, как в количественном, так и в процентном отношении приходится на предприятия, занимающиеся добычей угля и прочих полезных ископаемых.

Таблица 16. Структура парка одноковшовых экскаваторов предприятий, разрабатывающих месторождения прочих полезных ископаемых

Фирмы-производители	Общее количество экскаваторов, ед	Численность экскаваторов по типоразмерным группам, ед			
		I группа	II группа	III группа	IV группа
Отечественные производители					
Уралмашзавод	11	-	-	11	-
Прочие	2	2	-	2	-
Всего	15	2	-	13	-
Зарубежные производители					
Caterpillar	4	3	-	1	-

Hitachi	3	1	2	-	-
Liebherr	2	-	-	2	-
Прочие	3	2	1	-	-
Всего	12	6	3	3	-
Итого экскаваторов	**27**	**8**	**3**	**16**	**-**

Таблица 17. Структура бульдозерных парков предприятий, разрабатывающих месторождения прочих полезных ископаемых

Фирмы-производители	Общее количество бульдозеров, ед	Численность бульдозеров по классам, ед		
		Средние	Тяжелые	Сверхтяжелые
Отечественные производители				
ОАО «Промтрактор»	5	-	3	2
ЧТЗ-Уралтрак	7	5	2	-
Всего	12	5	5	2
Зарубежные производители				
Caterpillar	4	-	1	3
Komatsu	1	-	1	-
Прочие	1	1	-	-
Всего	6	1	2	3
Итого бульдозеров	**18**	**6**	**7**	**5**

Пути совершенствования комплектации парков горного оборудования

В настоящее время в связи со значительным снижением мировых цен на драгоценные металлы горнодобывающим предприятиям необходимо оптимизировать издержки производства. Повысить эффективность разработки месторождений драгоценных металлов можно за счет усовершенствования технологий ведения работ, а также внедрения в производство новых и усовершенствованных типов горного оборудования. Так в настоящее время многие золотодобывающие предприятия, использующие при разработке россыпей мощные современные бульдозеры и экскаваторы зарубежного производства, промывают золотосодержащие пески на устаревших приборах типа ПГШ, которые имеют малую эффективность при работе с глинистыми песками россыпей и, соответственно, высокий уровень потерь золота в хвостах. В ИГД ДВО РАН разработаны усовершенствованные промывочные приборы, позволяющие значительно снизить потери золота особенно мелких и тонких классов [5, с. 33]. При ведении вскрыши и выемке золотосодержащих песков на разработке россыпей при расстояниях транспортировки породы более 80-100 метров целесообразно использование скрепер-дозеров, которые обеспечивают

меньшие удельные эксплуатационные затраты по сравнению с бульдозерами [11, с. 42].

При разработке некоторых месторождений угля и цементного сырья целесообразно переходить с циклических технологий, связанных с применением буровзрывных работ, на циклично-поточные технологии с применением карьерных комбайнов и компактных роторных экскаваторов, перегрузочных бункеров и конвейерных систем.

Совершенствование техники и технологий разработки месторождений позволит горнодобывающим предприятиям повысить эффективность горного производства и снизить потери полезного ископаемого в недрах, особенно при разработке сложноструктурных месторождений.

Список использованной литературы:

1. Орлов В.П. Минерально-сырьевая база и минерально-сырьевой комплекс в экономике северных и восточных регионов // Минеральные ресурсы России. Экономика и управление 2013. №5. С. 2-5.

2. Отчеты за 2012г. – Дата обновл. 5.11.2014. newsruss.ru/doc/index.php/

3. Архипов Г.И. Горно-добывающая промышленность // Минеральные ресурсы России. Экономика и управление 2013. №5. С. 165-175.

4. Кашуба С.Г. Итоги производства золота в России в 2013 году // Золото и технологии. – 2014. - №1. – С. 4-5.

5. Рассказов И.Ю., Чебан А.Ю., Литвинцев В.С. Анализ технической оснащенности горнодобывающих предприятий Хабаровского края и Еврейской автономной области // Горный журнал. – 2013. №2. С. 30-34.

6. Гальперин М.И., Домбровский Н.Г. Строительные машины: Учебник для вузов.- 3-е изд., перераб и доп. – М.: Высшая школа, 1980.- 344с., ил.

7. Богданов Е.И. Оборудование для транспорта и промывки песков россыпей. М., «Недра», 1978. 240 с.

8. Скрыль А.И. Угольная промышленность – состояние и перспективы развития // Минеральные ресурсы России. Экономика и управление. 2013. - №5. – С.74-80.

9. Чебан А.Ю. Выемочная техника, задействованная на угольных разрезах в южной части Дальневосточного региона // Вестник ТОГУ. 2013. - №3. – С. 81-84.

10. Чебан А.Ю., Секисов Г.В., Соболев А.А. Состояние и основные пути развития добычи природных строительных материалов в южных субрегионах Дальневосточного округа // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2014. - №7. С. 71-76.

11. Чебан А.Ю., Рассказов И.Ю., Литвинцев В.С. Анализ парка горных машин горнодобывающих предприятий Амурской области // Маркшейдерия и недропользование. 2012. - №2. - С. 41-50.

© А.Ю. ЧЕБАН, 2014

СОДЕРЖАНИЕ

А.Н. Земцов
ОЦЕНКА ЭФФЕКТИВНОСТИ АЛГОРИТМОВ МАРКИРОВАНИЯ ЦИФРОВЫХ ИЗОБРАЖЕНИЙ В ЧАСТОТНОЙ ОБЛАСТИ НА ОСНОВЕ ДИСКРЕТНОГО ВЕЙВЛЕТ-ПРЕОБРАЗОВАНИЯ 3

Н.В. Кенийз
ТЕХНОЛОГИЯ ПРОИЗВОДСТВА ЗАМОРОЖЕННЫХ ПОЛУФАБРИКАТОВ С КРИОПРОТЕКТОРАМИ 19

А.Н. Мамаев, Т.А. Балабина
ИССЛЕДОВАНИЯ ПО КАЧЕНИЮ ЭЛАСТИЧНЫХ КОЛЕС 35

В.В. Марков
МЕТОД НЕРАЗРУШАЮЩЕГО КОНТРОЛЯ КАЧЕСТВА СБОРКИ ОПОРЫ КАЧЕНИЯ ПО ПАРАМЕТРАМ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО СОПРОТИВЛЕНИЯ ПОДШИПНИКА 72

А.А. Нестеренко
ИНТЕНСИФИКАЦИЯ ТЕХНОЛОГИИ ПРОИЗВОДСТВА КОЛБАСНОЙ ПРОДУКЦИИ 94

Е.Г. Осинцев,
Дарья Владимировна Осинцева, Владимир Владимирович Бабкин
СЕПАРАЦИЯ СЕМЯН ПРИ СОВМЕСТНОМ ИСПОЛЬЗОВАНИИ ИНФОРМАЦИОННЫХ И ЭЛЕКТРОТЕХНОЛОГИЙ 111

В.Г. Сазыкин, А.Г. Кудряков, С.А. Нетребко
ТЕОРЕТИЧЕСКИЙ И ПРАКТИЧЕСКИЙ АСПЕКТЫ ПОВЫШЕНИЯ НАДЕЖНОСТИ КАБЕЛЬНЫХ ЛИНИЙ ЭЛЕКТРОПЕРЕДАЧИ 127

А. Ю. Чебан
ТЕХНИЧЕСКОЕ ОСНАЩЕНИЕ ГОРНОДОБЫВАЮЩИХ ПРЕДПРИЯТИЙ ЮГА ДАЛЬНЕВОСТОЧНОГО ФЕДЕРАЛЬНОГО ОКРУГА 154

Научное издание

АКТУАЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ ТЕХНИЧЕСКИХ НАУК: ТЕОРЕТИЧЕСКИЙ И ПРАКТИЧЕСКИЙ АСПЕКТЫ

КОЛЛЕКТИВНАЯ МОНОГРАФИЯ

В авторской редакции

Подписано в печать 29.12.2014 г. Формат 60x84/16.
Усл. печ. л.9,25 Тираж 500 Заказ № 184

Издательство "Аэтерна"
450076, г. Уфа, ул. Гафури 27/2
e-mail: info@aeterna-ufa.ru
Тел.: + 7 (347) 266 60 68